

**Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA  
Spécialité TOPOGRAPHIE**

**Étude d'opportunité et de faisabilité de l'extension  
du Canevas Topographique de la ville de Rennes sur  
le territoire de la Communauté d'agglomération de  
Rennes-Métropole.**

Présenté le 19 septembre 2013 par **Elodie LEGENDRE**

Réalisé au sein du : Service Système d'Information Géographique  
De la Communauté d'Agglomération de Rennes Métropole  
4 Avenue Henri Fréville  
35207 Rennes

Directeur de PFE : Mme Cécile TAMOUDI, Ingénieur principal, Responsable du Service SIG

Correcteur de PFE : M. Jacques LEDIG, Professeur des ENSAM à l'INSA, Responsable du  
laboratoire de Topographie



# REMERCIEMENTS

---

En introduction à ce mémoire de Projet de Fin d'Études, j'aimerais remercier l'ensemble des personnes qui ont permis la bonne réussite de ce projet.

Je tiens tout d'abord à remercier Cécile Tamoudi pour m'avoir accueillie au sein du service Système d'Information Géographique de Rennes Métropole. Je remercie également Cécile Olivier pour son implication dans ce projet et la confiance qu'elle m'a accordée.

Je remercie l'ensemble du service SIG pour leur accueil chaleureux et plus particulièrement l'unité Géodésie du service, dont Bertrand Guillopé et Robert Lebreton pour leur expertise en ce domaine.

Pour l'ensemble de ma formation à l'INSA de Strasbourg, je remercie les professeurs de Topographie ainsi que l'ensemble de mes camarades de promotion pour ces trois années passées en leur compagnie.

Je remercie également mes relecteurs qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble de ma famille dont mes parents qui m'ont suivie et soutenue tout au long de mes études.

Le dernier remerciement, et pas le moindre revient à mon mari Clément pour son soutien sur ce projet, mais également pour son soutien quotidien.



# SOMMAIRE

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| REMERCIEMENTS .....                                                           | i  |
| SOMMAIRE .....                                                                | i  |
| INTRODUCTION .....                                                            | 1  |
| Partie 1 ÉTAT DE L'ART SUR LES CANEVAS GÉODÉSIQUES ET ALTIMÉTRIQUES.....      | 3  |
| 1.1. Généralités sur les canevas géodésiques et altimétriques.....            | 4  |
| 1.1.1 Définition d'un canevas .....                                           | 4  |
| 1.1.2 Rappel des systèmes légaux en France.....                               | 4  |
| 1.1.2.1 Canevas planimétrique .....                                           | 4  |
| 1.1.2.2 Canevas altimétrique .....                                            | 4  |
| 1.2. Méthodes de mise en place d'un canevas .....                             | 5  |
| 1.2.1 Méthode pour la planimétrie .....                                       | 5  |
| 1.2.2 Méthodes pour l'altimétrie .....                                        | 6  |
| 1.2.2.1 Méthode classique pour l'établissement d'un canevas altimétrique..... | 6  |
| 1.2.2.2 Mise à jour par L'IGN du réseau de nivellement.....                   | 7  |
| 1.2.3 Méthodes GNSS .....                                                     | 8  |
| 1.2.3.1 Mode dynamique .....                                                  | 9  |
| 1.2.3.2 Mode statique .....                                                   | 9  |
| 1.2.3.3 Problèmes de l'altitude avec la technique GNSS.....                   | 10 |
| 1.2.3.4 Recommandations du CNIG.....                                          | 12 |
| 1.3. Quelques exemples de canevas géodésiques et altimétriques .....          | 14 |
| 1.3.1 En France.....                                                          | 14 |
| 1.3.1.1 Le Cher [Delbard, 1988].....                                          | 14 |
| 1.3.1.2 Le RGF93.....                                                         | 14 |
| 1.3.1.3 Liaison ferroviaire entre Lyon et Turin [Boissenot et al, 2009] ..... | 15 |
| 1.3.1.4 Compagnie du Rhône [Mure, 2012].....                                  | 15 |
| 1.3.2 À l'étranger.....                                                       | 16 |
| 1.3.2.1 Suisse [Varidel & Chapuis, 2002] .....                                | 16 |
| 1.3.2.2 Algérie [Ben Ahmed Daho, 2003].....                                   | 16 |
| 1.3.2.3 Maroc [El Fettah, 2003] .....                                         | 17 |
| 1.3.2.4 Israël [Tuchin et al, 2009] .....                                     | 19 |
| 1.4. Conclusion.....                                                          | 21 |
| Partie 2 CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....                                            | 23 |
| 2.1. Contexte général.....                                                    | 23 |
| 2.1.1 Rennes Métropole.....                                                   | 23 |
| 2.1.2 Le service SIG .....                                                    | 25 |
| 2.1.3 La base de données topographique.....                                   | 26 |
| 2.2. Les systèmes de coordonnées « Ville de Rennes » .....                    | 26 |
| 2.2.1 Le système géodésique VDR79.....                                        | 26 |
| 2.2.1.1 Transformation VDR79/Lambert II .....                                 | 28 |
| 2.2.1.2 Transformation VDR79/RGF93.....                                       | 28 |
| 2.2.1.3 Transformation RGF93/Lambert II .....                                 | 29 |
| 2.2.2 Le système géodésique REN09 .....                                       | 30 |
| 2.2.2.1 Problématique.....                                                    | 30 |
| 2.2.2.2 Le système REN09_VDR.....                                             | 30 |
| 2.2.2.3 Le système REN09_IGN.....                                             | 31 |
| 2.2.2.4 Choix du système géodésique .....                                     | 32 |
| 2.2.3 Système altimétrique .....                                              | 32 |
| 2.3. Définition des besoins .....                                             | 33 |

|                                                               |                                                                                                |     |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.1                                                         | Les besoins en terme de système de coordonnées .....                                           | 33  |
| 2.3.2                                                         | Les besoins en terme de classes de précisions.....                                             | 34  |
| 2.3.3                                                         | Les besoins en terme de canevas .....                                                          | 35  |
| 2.4.                                                          | Enquête auprès d'autres collectivités .....                                                    | 35  |
| 2.4.1                                                         | Canevas et mise en place.....                                                                  | 35  |
| 2.4.2                                                         | Contraintes liées aux transports en commun guidés.....                                         | 36  |
| 2.4.3                                                         | Contrôle de l'altimétrie.....                                                                  | 36  |
| 2.5.                                                          | Conclusion.....                                                                                | 37  |
| Partie 3 CHOIX DU SYSTÈME GÉODÉSIQUE ET MATÉRIALISATION ..... |                                                                                                | 39  |
| 3.1.                                                          | Choix du système de coordonnées planimétrique .....                                            | 40  |
| 3.1.1                                                         | Étude des différentes solutions envisageables.....                                             | 40  |
| 3.1.1.1                                                       | Toute l'agglomération en REN09 .....                                                           | 40  |
| 3.1.1.2                                                       | Toute l'agglomération en CC48 sauf le métro en REN09.....                                      | 41  |
| 3.1.1.3                                                       | Ville de Rennes en REN09 et Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48 .....                | 41  |
| 3.1.1.4                                                       | Ville de Rennes et certaines ZAC en REN09, Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48 ..... | 42  |
| 3.1.1.5                                                       | Intra-rocade en REN09, Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48 .....                     | 43  |
| 3.1.1.6                                                       | Ville de Rennes et sa périphérie en REN09, le reste en CC48 .....                              | 43  |
| 3.1.2                                                         | Solution choisie .....                                                                         | 45  |
| 3.1.2.1                                                       | Justifications .....                                                                           | 45  |
| 3.1.2.2                                                       | Impacts sur la base de données et les utilisateurs .....                                       | 45  |
| 3.2.                                                          | Choix de la mise en place d'un canevas .....                                                   | 46  |
| 3.2.1                                                         | Tests GNSS .....                                                                               | 46  |
| 3.2.1.1                                                       | Tests GNSS sur la Ville de Rennes .....                                                        | 46  |
| 3.2.1.2                                                       | Tests GNSS sur Rennes Métropole .....                                                          | 48  |
| 3.2.1.3                                                       | Préconisations sur le calcul en post traitement .....                                          | 51  |
| 3.2.2                                                         | Étude des différentes solutions envisageables.....                                             | 52  |
| 3.2.2.1                                                       | Création d'un canevas peu dense en XYZ.....                                                    | 53  |
| 3.2.2.2                                                       | Création d'un canevas altimétrique .....                                                       | 53  |
| 3.2.2.3                                                       | Pas de création de canevas .....                                                               | 55  |
| 3.2.3                                                         | Solution choisie .....                                                                         | 56  |
| 3.2.3.1                                                       | Justifications .....                                                                           | 56  |
| 3.2.3.2                                                       | Mise à disposition des données .....                                                           | 56  |
| 3.3.                                                          | Aspects administratifs .....                                                                   | 57  |
| 3.3.1                                                         | Encadrement des prestations .....                                                              | 57  |
| 3.3.1.1                                                       | Systèmes de références géographiques.....                                                      | 57  |
| 3.3.1.2                                                       | Classes de précision.....                                                                      | 57  |
| 3.3.2                                                         | Contrôle de l'altimétrie.....                                                                  | 57  |
| 3.3.3                                                         | Recommandation de méthodes pour les prestataires .....                                         | 58  |
| 3.4.                                                          | Conclusion.....                                                                                | 58  |
| Partie 4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....                     |                                                                                                | 59  |
| LISTE DES FIGURES .....                                       |                                                                                                | 61  |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                           |                                                                                                | 64  |
| SOMMAIRE DES ANNEXES .....                                    |                                                                                                | 67  |
| Annexe 1 LES MESURES GNSS .....                               |                                                                                                | 68  |
| Annexe 2 INVENTAIRE DES REPÈRES DE NIVELLEMENT .....          |                                                                                                | 71  |
| Annexe 3 RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE .....                         |                                                                                                | 72  |
| Annexe 4 CHANGEMENT DE RÉFÉRENTIEL .....                      |                                                                                                | 78  |
| Annexe 5 EMPRISE DU REN09.....                                |                                                                                                | 86  |
| Annexe 6 ARRÊTÉ SUR LES CLASSES DE PRÉCISION .....            |                                                                                                | 92  |
| Annexe 7 RÉSULTATS DES TESTS GNSS .....                       |                                                                                                | 98  |
| Annexe 8 MODE D'EMPLOI TRIMBLE BUSINESS CENTER.....           |                                                                                                | 105 |
| Annexe 9 ASPECTS ADMINISTRATIFS .....                         |                                                                                                | 116 |

# INTRODUCTION

---

Le pôle Données Topographiques du service SIG de la Ville de Rennes a été mutualisé depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2010 avec la communauté d'agglomération de Rennes Métropole. Ce dernier doit désormais adapter ses pratiques en matière de topographie à son nouveau périmètre d'intervention élargi à 650 km<sup>2</sup> sur 37 communes supplémentaires.

Disposant d'un historique de données topographiques de plus de trente ans, d'une capacité humaine de douze agents ainsi que de fortes compétences, le pôle dispose ainsi d'une base de données topographique de surface et de sous-sol homogène de très bonne qualité couvrant la totalité du domaine public et privé de la Ville de Rennes (soit plus de 450 km de voirie). Cette base de données est mise à jour aujourd'hui quotidiennement en interne.

La base de données topographique à la particularité de s'appuyer sur une projection conique conforme, le REN09, réalisée en interne et validée par l'IGN<sup>1</sup>. Sa création a été justifiée par une altération linéaire des systèmes nationaux sur le secteur de la ville de Rennes considérée comme trop élevée, mais également par les projets des deux lignes de métro.

Suite à cette mutualisation, les compétences du service SIG s'étendent désormais sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole. Une question se pose alors : comment les modes opératoires du pôle Données Topographiques doivent-ils être adaptés sur ce nouveau territoire ? Et plus largement, si l'ensemble des objectifs et des contraintes ne nous amène pas vers un changement de ces modes opératoires.

Ce PFE a donc pour but d'étudier les possibilités qui s'offrent à Rennes Métropole, notamment d'un point de vue de l'utilisation des systèmes géodésiques et de la création d'un canevas. Cette réflexion permettra de faciliter la mise en œuvre des compétences du service sur le nouveau territoire.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Cerner le contexte particulier de Rennes Métropole en matière de topographie.
- Définir les besoins de Rennes Métropole hors Ville de Rennes d'un point de vue du système géodésique et de la précision des données.
- Déterminer le ou les systèmes géodésiques à mettre en œuvre sur l'ensemble de l'agglomération.
- Étudier la faisabilité d'un canevas sur Rennes Métropole hors Ville de Rennes.

---

<sup>1</sup> Institut National de l'information Géographique et forestière

## Introduction

Ce mémoire sera articulé autour de trois chapitres.

Le premier consistera en la mise en place d'un état de l'art consacré à la réalisation de canevas géodésique et altimétrique.

Le second chapitre permettra de cerner les particularités de Rennes et métropole et ainsi de définir ces besoins en matière de topographie sur Rennes Métropole hors Ville de Rennes.

Enfin, le dernier chapitre sera consacré au choix du système géodésique sur Rennes Métropole, mais également au choix de la matérialisation ou non d'un canevas sur Rennes Métropole hors Ville de Rennes. La décision de la mise en place d'un canevas sera appuyée sur des tests GNSS réalisés sur l'ensemble de l'agglomération.

# Partie 1

## ÉTAT DE L'ART SUR LES CANEVAS GÉODÉSQUES ET ALTIMÉTRIQUES

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÉTAT DE L'ART SUR LES CANEVAS GÉODÉSQUES ET ALTIMÉTRIQUES.....                | 3  |
| 1.1. Généralités sur les canevas géodésiques et altimétriques.....            | 4  |
| 1.1.1 Définition d'un canevas .....                                           | 4  |
| 1.1.2 Rappel des systèmes légaux en France.....                               | 4  |
| 1.1.2.1 Canevas planimétrique .....                                           | 4  |
| 1.1.2.2 Canevas altimétrique .....                                            | 4  |
| 1.2. Méthodes de mise en place d'un canevas .....                             | 5  |
| 1.2.1 Méthodes pour la planimétrie .....                                      | 5  |
| 1.2.2 Méthodes pour l'altimétrie .....                                        | 6  |
| 1.2.2.1 Méthode classique pour l'établissement d'un canevas altimétrique..... | 6  |
| 1.2.2.2 Mise à jour par L'IGN du réseau de nivellement.....                   | 7  |
| 1.2.3 Méthodes GNSS .....                                                     | 8  |
| 1.2.3.1 Mode dynamique .....                                                  | 9  |
| 1.2.3.2 Mode statique .....                                                   | 9  |
| 1.2.3.3 Problèmes de l'altitude avec la technique GNSS.....                   | 10 |
| 1.2.3.4 Recommandations du CNIG.....                                          | 12 |
| 1.3. Quelques exemples de canevas géodésiques et altimétriques .....          | 14 |
| 1.3.1 En France.....                                                          | 14 |
| 1.3.1.1 Le Cher [Delbard, 1988].....                                          | 14 |
| 1.3.1.2 Le RGF93 .....                                                        | 14 |
| 1.3.1.3 Liaison ferroviaire entre Lyon et Turin [Boissenot et al, 2009] ..... | 15 |
| 1.3.1.4 Compagnie du Rhône [Mure, 2012].....                                  | 15 |
| 1.3.2 À l'étranger.....                                                       | 16 |
| 1.3.2.1 Suisse [Varidel & Chapuis, 2002] .....                                | 16 |
| 1.3.2.2 Algérie [Ben Ahmed Daho, 2003].....                                   | 16 |
| 1.3.2.3 Maroc [El Fettah, 2003] .....                                         | 17 |
| 1.3.2.4 Israël [Tuchin et al, 2009] .....                                     | 19 |
| 1.4. Conclusion.....                                                          | 21 |

Depuis les débuts de la topographie moderne, des canevas ont été les supports des levés topographiques. Ils restent encore essentiels aujourd'hui pour assurer des prestations topographiques de qualité. C'est pourquoi un état de l'art sur les canevas a été réalisé. Dans un premier temps, nous verrons quelques généralités. Dans une seconde partie, nous rappellerons les méthodes utilisées pour la mise en place d'un canevas. Enfin, nous nous attarderons plus sur la technique du GNSS avec quelques exemples.

## **1.1. Généralités sur les canevas géodésiques et altimétriques**

### **1.1.1 Définition d'un canevas**

Un canevas est un ensemble de points matérialisés connus en planimétrie et/ou en altimétrie. Une définition est disponible dans le document de la Direction Générale des Impôts (11 G-1-88, instructions du 1er juillet 1988) qui concerne en particulier les travaux cadastraux et issue de l'Arrêté Interministériel du 21 janvier 1980 : « D'une façon générale, le canevas est un ensemble discret de points, bien répartis sur la surface à lever, dont les positions relatives sont déterminées avec une précision au moins égale à celle que l'on attend du levé. Ces points servent d'appui au lever des détails. Le canevas s'exprime par les coordonnées de ces points dans un même système. »

En France, deux canevas ont été mis en place, un planimétrique, le Réseau Géodésique Français (RGF93) et un altimétrique, le nivellement général de la France (NGF).

### **1.1.2 Rappel des systèmes légaux en France**

#### **1.1.2.1 Canevas planimétrique**

Depuis le décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 complété par le décret n° 2006-272 du 3 mars 2006, le système national de référence de coordonnées géographiques en France métropolitaine est le RGF93<sup>2</sup> remplaçant la NTF<sup>3</sup>. Ce système a désormais pour projection les projections Lambert 93 et coniques conformes neuf zones associées à l'ellipsoïde de référence IAG GRS 1980<sup>4</sup> et ayant pour méridien origine le méridien de Greenwich. La projection conique conforme neuf zones a été créée pour compléter celle du Lambert 93 afin de diminuer l'altération linéaire. En effet, la France est désormais découpée en neuf zones différentes du nord au sud du territoire métropolitain avec un recouvrement de 50 % entre zones. L'altération linéaire y est donc moins forte qu'avec la projection Lambert 93 qui elle, couvre tout le pays.

#### **1.1.2.2 Canevas altimétrique**

Le système altimétrique légal en France est le réseau IGN 1969. Il a été créé de 1962 à 1969, par l'Institut Géographique National qui a remis en état le réseau existant. Les altitudes sont de type normal et prennent en compte les mesures de pesanteur réelles.

---

<sup>2</sup> Réseau Géodésique Français 1993

<sup>3</sup> Nouvelle Triangulation Française

<sup>4</sup> International Association of Geodesy – Geodetic Reference System 1980

## 1.2. Méthodes de mise en place d'un canevas

### 1.2.1 Méthode pour la planimétrie

Le XVIII<sup>e</sup> siècle a vu l'émergence des premières cartes nationales sur le territoire de la France. Ces cartes permettent de répondre aux besoins de défense et de gestion du territoire de l'État français. Pour réaliser ces cartes, un canevas a dû être mis en place.

Les premiers ont été réalisés par triangulation ; c'est une méthode qui consiste en des mesures d'angles et de distances entre points intervisibles et qui utilise les ressources de la trigonométrie pour les calculs. Plusieurs canevas géodésiques se sont succédé en France :

- La triangulation de Cassini qui est la première mise en place par triangulation sur la France, elle a débuté dans les années 1730. Plusieurs générations de Cassini se sont succédées pour aboutir à la création des cartes portant leur nom.
- La Triangulation des Ingénieurs Géographes qui s'appuie sur la méridienne de Delambre et Méchain est la base géométrique des cartes d'état-major. Elle a débuté en 1793 et a utilisé également la méthode de triangulation.
- La Nouvelle Triangulation Française qui est une réalisation bidimensionnelle reposant sur des mesures angulaires a débuté fin XIX<sup>e</sup> siècle et s'est terminée en 1991. Le réseau de triangulation était hiérarchisé en plusieurs ordres, un exemple est présenté figure 1. Au total, la NTF comporte cinq ordres dont le premier est la méridienne de France. Plus de 80 000 points forment ce réseau, soit un point géodésique pour neuf km<sup>2</sup>.
- Le RGF93 qui est désormais utilisé en France est un système tridimensionnel. Sa détermination a débuté en 1989 et a été réalisée par observations GNSS. Il est composé de trois ordres :
  - *Le RRF*<sup>5</sup> qui comporte 23 sites distants en moyenne de 200 km.
  - *Le RBF*<sup>6</sup> qui comporte 1 032 sites distants en moyenne de 25 km.
  - *Le RDF*<sup>7</sup> qui comporte environ 75 000 sites.

À part l'amélioration technique des instruments, le principe de réalisation d'un canevas n'a pas beaucoup évolué pendant des décennies.

D'autres méthodes telles que la photogrammétrie, les méthodes inertielles, les appareils à onde lumineuse ou radioélectrique ont pu être utilisées dans la détermination de coordonnées d'un point précisément et sont citées dans [Bonin, 1986]. Des moyens plus classiques peuvent également être mis en place tels que le cheminement polygonal ou bien la trilatération.

Aujourd'hui, avec l'émergence des nouvelles techniques, le canevas est de plus en plus réalisé au GNSS.

---

<sup>5</sup> Réseau de Référence Français

<sup>6</sup> Réseau de Base Français

<sup>7</sup> Réseau de Détail Français

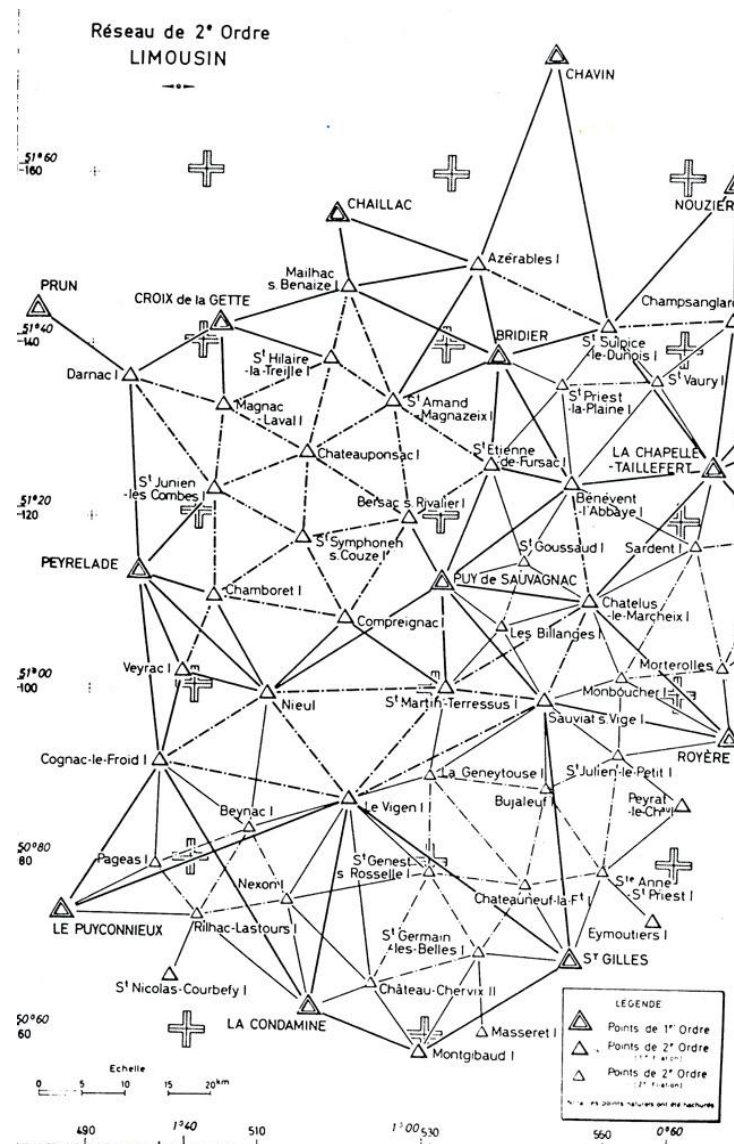


**Figure 1 : Exemple de triangulation de la NTF dans le Limousin, [IGN, 2013].**

### 1.2.2 Méthodes pour l'altimétrie

#### 1.2.2.1 Méthode classique pour l'établissement d'un canevas altimétrique

Les premiers traités sur le nivellement en France datent du XVIII<sup>e</sup> siècle. Dès lors, la mer est considérée comme la surface pouvant servir de niveau zéro. Cependant, des systèmes locaux avec des surfaces de niveau zéro différentes voient encore le jour. Ceci pose problème lors des travaux de grande ampleur sur le territoire. Dès le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, des campagnes nationales de nivellement sont mises en place, trois réseaux de nivellement général se sont succédé en France métropolitaine :

- Le réseau Bourdalouë. Les travaux ont commencé en 1857 et ont duré sept ans. Ils ont été réalisés sous la coupole de Paul-Adrien Bourdalouë, notamment connu pour son nivellement entre la mer Méditerranée et la mer Rouge. L'origine de ce réseau est appelée le zéro Bourdalouë et a pour origine le trait 0,40 m de l'échelle de marée du Fort St-Jean à Marseille.

- Le réseau Lallemant. Il a été mis en place par Charles Lallemant entre 1884 et 1922 pour compléter le travail de Bourdalouë. Ce sont des altitudes orthométriques qui ont été définies prenant en compte des valeurs de pesanteurs théoriques. Le zéro est quant à lui fixé 71 mm au-dessous de celui de Bourdalouë.
- L'IGN 69. Il est le réseau de nivellement actuellement en vigueur.

La mise en place d'un canevas altimétrique a depuis toujours été réalisée en nivellement direct. Aujourd'hui, le principe reste inchangé, mais le nivellement motorisé permet de réaliser des cheminements beaucoup plus rapidement. Cette technique est encore utilisée dans les régions n'ayant pas de réseau dense.

#### 1.2.2.2 Mise à jour par L'IGN du réseau de nivellement

Les informations suivantes sont issues de [Coulomb, 2009] et [IGN, 2013].

Avant 2000, l'entretien du réseau consistait en la remise en état des lignes de nivellement en partie détériorées (remplacement des repères détruits, densification dans les agglomérations, nouvelles mesures...).

Suite à une enquête faite auprès des utilisateurs en 1998, un besoin de connaissance millimétrique des repères s'est fait ressentir. Pour cela, il y a eu nécessité de mieux entretenir et mieux répartir le réseau. Pour ce faire, une campagne de mise en place de triplets a débuté en 2008 et devra durer 12 ans. La figure 2 illustre le plan d'action de l'IGN. La distance entre deux repères d'un triplet sera inférieure au kilomètre, ce qui permettra les contrôles de stabilité des repères plus facilement. De plus, la dénivellée entre repères ne devra pas dépasser trente mètres, la zone d'influence d'un triplet sera de cinq kilomètres et enfin, le recouvrement des zones d'influences devra être le plus faible possible. Tout cela permettra une meilleure répartition des repères sur le territoire. La précision relative à l'intérieur d'un triplet est comparable à celle d'un réseau du deuxième ordre NGF/IGN69, soit un écart type de 2,3 mm par kilomètre. Cependant, chaque point du triplet peut avoir un ordre différent allant du 1<sup>er</sup> au 3<sup>ème</sup>. Les fiches signalétiques seront mises à jour et une notion 'Ce repère appartient à un triplet' sera spécifiée. Il faudra donc privilégier l'utilisation de ces triplets, car les autres repères de nivellement ne feront plus l'objet de nouvelles mesures. [Coulomb, 2013a]

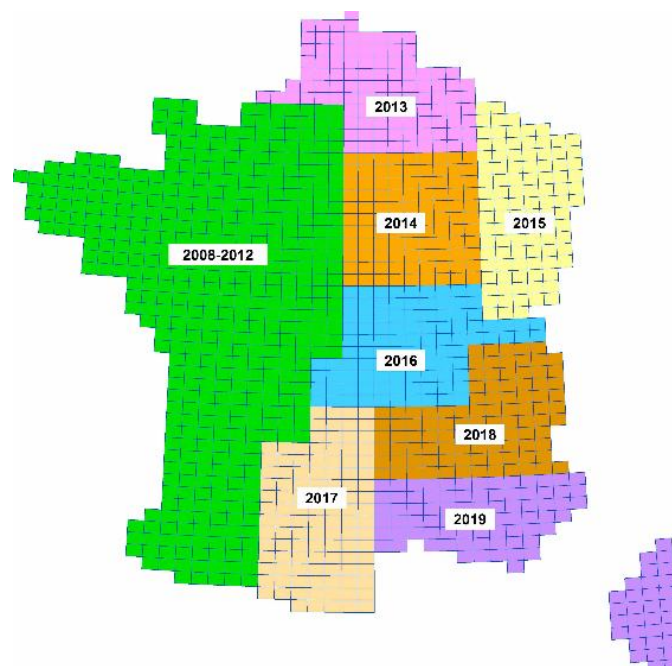


Figure 2 : Carte d'avancement prévisionnel de l'entretien du réseau de nivellement par les triplets, [IGN, 2013].

Grâce à la mise en place de ces triplets et à la généralisation des méthodes de levé au GNSS, le nivellement par GNSS sera désormais possible dans certaines conditions. Tout d'abord, la stabilité des triplets devra être vérifiée par nivellement direct puis la différence de hauteur au-dessus de l'ellipsoïde entre les deux sites sera déterminée par méthode GNSS. Pour garantir la meilleure précision possible, l'IGN préconise d'avoir une distance maximale entre les deux récepteurs de cinq kilomètres, une précision centimétrique sera alors possible. La figure 3 illustre ce principe. Il faudra bien garder en tête que la précision de cette méthode est centimétrique, c'est-à-dire inférieure ou égale à cinq centimètres.

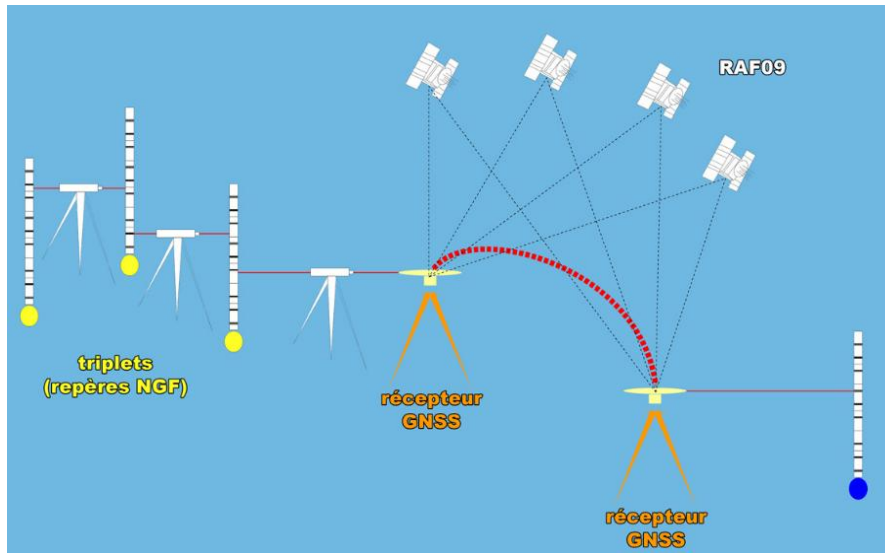


Figure 3 : Schéma des observations rendues possibles par l'existence de triplets, [IGN, 2013].

### 1.2.3 Méthodes GNSS

Deux modes de calcul sont possibles au GNSS : le mode absolu avec une précision de l'ordre du mètre [Durand, 2003] et le mode différentiel qui est lui beaucoup plus précis. En effet, c'est cette méthode qui est principalement utilisée en géodésie et en topographie actuellement.

Le mode absolu ne fait pas intervenir de stations de référence, un mobile seul est suffisant (exemple le plus répandu : le GPS de poche). La figure 4 illustre ce principe.

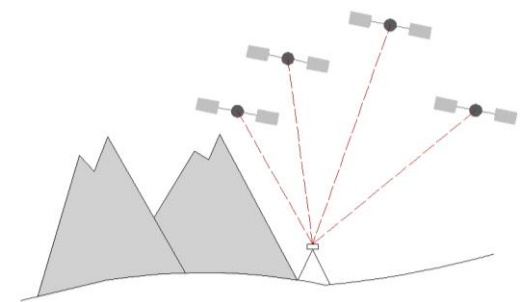


Figure 4 : Mode absolu.

Le mode différentiel quant à lui fait intervenir une à plusieurs stations de référence en plus du récepteur comme présenté figure 5.

Au sein de ces deux modes, il est possible de travailler en dynamique ou en statique.

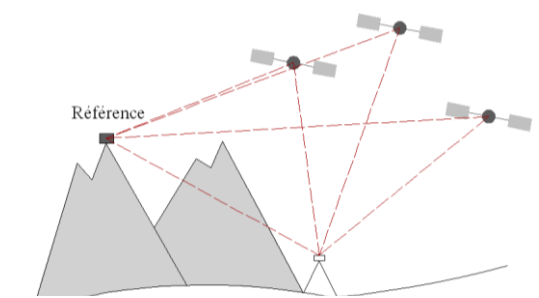


Figure 5 : Mode différentiel.

### 1.2.3.1 Mode dynamique

Lors de ce mode, le récepteur ne reste pas fixe pendant toute la durée de l'opération contrairement au mode statique. En effet, ce mode permet de prendre les points successivement sans remettre en station à chaque point. Une phase d'initialisation plus ou moins longue selon la méthode est nécessaire. Deux approches ont été développées au cours de ces quinze dernières années : le RTK<sup>8</sup> et le PPP<sup>9</sup> [Chassagne, 2012].

Le RTK, qui est également disponible en mode statique, nécessite la présence de station de référence au voisinage connue avec précision. Ce mode, à l'encontre du PPP, est le plus répandu aujourd'hui en topographie dans le cadre du mode dynamique.

Le PPP est, contrairement au RTK, disponible dans le monde entier car il ne nécessite pas la présence de station de référence. Il a été pour le moment principalement développé pour le post traitement (cf § 1.2.3.2), mais tend à se développer en mode dynamique. Son principal inconvénient est le délai d'initialisation standard qui est pour le moment d'environ trente minutes pour le récepteur. Ce délai d'initialisation va rapidement diminuer. En effet, dans un État aux États-Unis, l'initialisation est déjà possible en une minute avec le RTX<sup>10</sup>. De plus, pour avoir une grande précision, la position exacte des satellites et les erreurs d'horloge doivent être connues. Certains organismes publics mettent à disposition ces informations en quasi-temps réel, mais la majorité des récepteurs n'ont pas encore accès à internet pour obtenir ces informations, ce qui dégrade la précision des résultats.

Trimble propose une nouvelle technologie de haute précision GNSS appelée Trimble RTX. Grâce aux données en temps réel observées, on peut obtenir une précision de 3,8 cm en planimétrie avec un temps d'initialisation standard d'environ trente minutes [Rizos et al, 2012], [Trimble, 2013]. Comme vu précédemment, le délai d'initialisation tend à diminuer mais ne s'est pas encore généralisé.

Depuis le 1<sup>er</sup> avril 2013, un service en temps réel a également été mis en place par l'IGS<sup>11</sup>, le RTS<sup>12</sup>. C'est un service public et gratuit disponible actuellement en version bêta, seul le GPS est pris en compte pour le moment. Un exemple est cité dans [XYZ, 2013], sur 24 heures, ils ont obtenu des écarts maximaux au point connu de 0,2 m en élévation et de 0,1 m dans les directions est et nord. Le principal inconvénient est la réalisation de changement de coordonnées de systèmes régionaux comme ETRF2000 ou bien de référence terrestre comme ITFR2008. Les constructeurs de matériel se penchent aujourd'hui sur cette méthode de détermination GNSS, les résultats de leurs premiers tests devraient voir le jour d'ici peu.

Le PPP peut donc être aujourd'hui une alternative au positionnement différentiel et devrait pouvoir s'étendre à beaucoup d'utilisateurs notamment grâce à l'intérêt porté par les constructeurs à cette méthode.

### 1.2.3.2 Mode statique

Avec cette méthode, les récepteurs restent fixes tout au long de la mesure. Le temps d'observation dépend de la précision requise, mais également de la longueur de la base (temps d'observation = 20 min + 1 min/km [Duquenne et al, 2005b]).

---

<sup>8</sup> Real Time Kinematic

<sup>9</sup> Precise Point Positioning

<sup>10</sup> Real Time eXtended

<sup>11</sup> International GNSS Service

<sup>12</sup> Real Time Service

Ce mode différentiel est le plus répandu et est utilisé dans la détermination de canevas mais aussi dans les mesures de grandes précisions. Il est possible de calculer des points en mode différentiel avec un réseau de stations ou en absolu (PPP).

Avec l'émergence de nouveaux systèmes de positionnement par satellites tels que GLONASS pour les Russes, GALILEO pour les Européens ou bien encore Beidou et IRNSS pour la Chine et l'Inde, la précision des résultats devrait encore augmenter. En effet, dans l'étude de [Grinter & Roberts, 2011], une comparaison des précisions avec utilisation du GPS seul et du GPS et GLONASS combinés, montre une augmentation de la précision comme illustré figure 6.

L'utilisation très prochaine de GALILEO devrait permettre d'obtenir encore de meilleurs résultats. Tout cela fait de ce mode le plus précis pour le moment et donc le plus approprié pour la réalisation de canevas de précision.

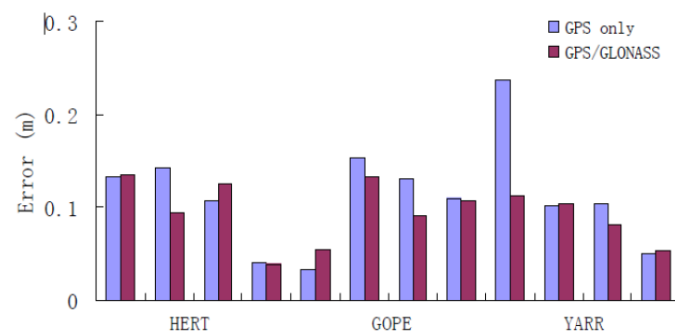


**Figure 6 : Précision des observations GPS et GPS/GLONASS pour trois stations de l'IGS [Grinter & Roberts, 2011].**

Le calcul de coordonnées d'un point avec précision est aujourd'hui possible grâce au mode de post-traitement et permet d'atteindre une précision centimétrique [Chassagne, 2012]. Pour ce faire, les logiciels de post-traitement prennent en compte certaines sources d'erreurs et réalisent les corrections nécessaires. Des modèles de troposphère (modèle de Hopfield, d'Herring... [Fund, 2009]) et d'ionosphère peuvent être définis. De plus, la disponibilité d'éphémérides précises et la précision des horloges des satellites permettent une meilleure connaissance des orbites de ces derniers. Des fichiers de calibrage d'antenne peuvent également être renseignés dans les logiciels.

Chaque constructeur d'appareil fournit son propre logiciel de post-traitement, mais d'autres logiciels sont disponibles sur le marché comme Bernese réalisé par l'université de Bern.

Enfin, le calcul en absolu tend à se développer. De nouveaux outils gratuits de positionnement PPP sont disponibles sur internet. En effet, l'utilisateur peut envoyer ses fichiers au format Rinex par courriel et recevoir ses résultats quelques minutes plus tard. Les coordonnées ainsi obtenues ne se trouvent pas directement dans le système légal français, des changements de coordonnées sont donc nécessaires. Quelques études ont déjà eu lieu et montrent que pour se rapprocher de la qualité des méthodes statiques différentielles, il faudrait réaliser des observations d'au moins trois heures [Morel, 2013].

#### 1.2.3.3 Problèmes de l'altitude avec la technique GNSS

Dès les prémices de l'utilisation du GNSS, la détermination des altitudes avec cette méthode a posé des problèmes [Kasser, 1998].

Le système légal en termes d'altitude est l'IGN 69 pour la France métropolitaine. Ces altitudes sont données par rapport à un quasi-géoïde contrairement aux altitudes orthométriques qui sont, elles, données par rapport au géoïde. Le problème qui se pose est qu'avec une détermination au GNSS, nous obtenons des altitudes par rapport à un ellipsoïde (surface mathématique, facilement modélisable). Il existe donc un décalage entre ces deux altitudes qu'il est difficile de modéliser de façon précise, mais nécessaire pour les conversions entre systèmes. La figure 7 représente ce décalage. En effet, le géoïde correspond à la surface moyenne des océans au repos prolongée sous les continents. Il dépend du champ gravitationnel terrestre et des masses géologiques environnantes, cette surface est donc très difficile à modéliser. Cependant, des méthodes existent pour déterminer un modèle de géoïde, méthode de Stokes, utilisation de modèles mondiaux, mesures astrogéodésiques, ... [Ledig, 2012].

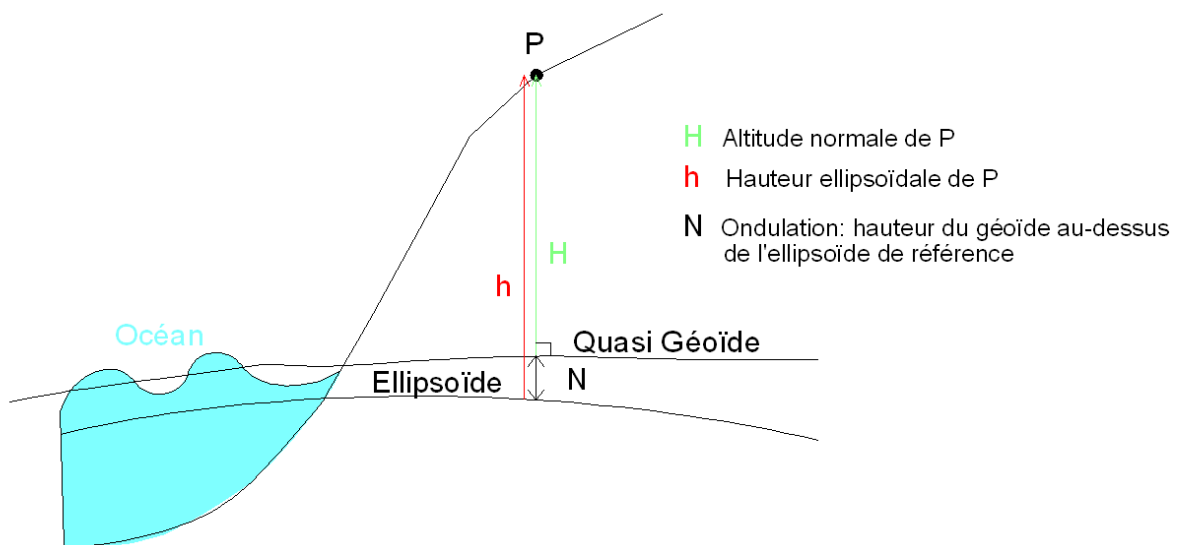


Figure 7 : Représentation des différentes altitudes, [Nocquet et al, 2000, modifié]

Pour résoudre ce problème, la France a créé le quasi-géoïde QGF98. Pour ce faire, trois types de données ont été nécessaires : le modèle global de champ OSU91A, des valeurs d'anomalies de pesanteur et un modèle numérique de terrain d'un pas de 140 mètres. Ce quasi-géoïde sert de référence altimétrique pour l'IGN69.

Depuis 2000, des mesures de gravimétrie sont réalisées au sein du SGN<sup>13</sup> pour améliorer le modèle du géoïde.

Du fait que la référence de l'IGN69 (ellipsoïde IAG GRS 80) et celle du GNSS (ellipsoïde WGS 84) ne sont pas la même, il a été nécessaire de créer une grille de transformation, la RAF98. Le pas de la grille de transformation est de 0,025° en latitude et 0,033° en longitude, soit un point tous les 2,7 km. La précision peut maintenant atteindre 2 à 3 cm en altimétrie.

Cette grille a été mise à jour par une campagne GNSS entre 2000 et 2008. Elle s'appelle désormais RAF09 et a une précision de 1 à 2 cm.

D'après [Coulomb, 2013 b], une nouvelle grille devra voir le jour en 2019 qui s'appuie notamment sur les triplets et qui couvrira 80 % du territoire français (excepté en haute montagne).

<sup>13</sup> Service de Géodésie et de Nivellement

Des grilles intermédiaires seront créées à l'avancement de la mise en place des triplets. En effet, une grille de transformation devrait voir le jour fin 2013 pour les régions de l'Ouest, les premières à avoir été dotées de triplets.

#### **1.2.3.4 Recommandations du CNIG**

Des recommandations ont été mises en ligne par la Commission Géopositionnement du CNIG pour la détermination de points avec la méthode du GNSS [Legros, 2013].

Une liste de prérequis sur la réalisation d'observations GNSS de qualité a été mise en place. On y retrouve des informations sur l'ionosphère, la troposphère, la répartition des satellites, les multi trajets, les masques ou bien encore le rapport signal sur bruit. Tout cela permet de réaliser des observations dans les meilleures conditions possibles.

Sept fiches ont été définies en fonction du type de travail effectué : levé simple, implantation, contrôle de levé, rattachement, canevas ou bien encore auscultation. Ces fiches sont classées en deux catégories, cinématique ou statique puis également en deux sous-catégories, temps réel ou post-traitement. Chaque fiche décrit le principe de la méthode, la planification de la mission, la phase terrain et enfin la phase bureau.

Une check-list de chaque méthode est réalisée pour faciliter le travail des utilisateurs et une liste des vérifications à réaliser avant le commencement de la mission est également disponible.

|                                                       | Fiche 1                                                                              | Fiche 2                                                                                                                                                                     | Fiche 3                                                                                           | Fiche 4             | Fiche 5                                                                              | Fiche 6                                                                     | Fiche 7                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Méthode                                               | Cinématique                                                                          |                                                                                                                                                                             |                                                                                                   |                     | Statique                                                                             |                                                                             |                                                                                              |
|                                                       | Temps réel                                                                           |                                                                                                                                                                             | Post-traitement                                                                                   |                     | Temps réel                                                                           | Post-traitement                                                             |                                                                                              |
|                                                       | NRTK                                                                                 | RTK « pivot libre »                                                                                                                                                         | NPPK                                                                                              | PPK « pivot libre » | NRTK moyenné                                                                         | Pivot central                                                               | Multi-stations                                                                               |
| Moyens matériels<br>(capteurs, logiciels, abonnement) | + /+++                                                                               | +++                                                                                                                                                                         | + /++                                                                                             | +++                 | + /++                                                                                | + /++                                                                       | +++                                                                                          |
| Savoir-faire                                          | +                                                                                    | ++                                                                                                                                                                          | ++                                                                                                | ++                  | +                                                                                    | ++                                                                          | +++                                                                                          |
| Moyens humains<br>(personnel, temps passé)            | +                                                                                    | + /++                                                                                                                                                                       | +                                                                                                 | + /++               | +                                                                                    | + /+++                                                                      | +++                                                                                          |
| Gamme de précision (1σ)                               | 2-5cm                                                                                |                                                                                                                                                                             |                                                                                                   |                     | 2-3cm                                                                                | < 2cm                                                                       |                                                                                              |
| Types de travaux                                      | Lever cinématique, implantation                                                      |                                                                                                                                                                             | Lever cinématique, contrôle levers temps réel                                                     |                     | Lever, contrôle, rattachement                                                        | Canevas, contrôle                                                           | Contrôle, auscultation                                                                       |
| Limitations                                           | Couverture du réseau GNSS<br>Couverture du réseau GPRS (existence de zones blanches) | Disponibilité UHF (avec possibilité de faire du GSM/GPRS) Précision dépendant de la ligne de base<br>Stabilité du pivot durant le lever<br>Surveillance éventuelle du pivot | Pas d'implantation possible Calcul du point non garanti avant traitement                          |                     | Couverture du réseau GNSS<br>Couverture du réseau GPRS (existence de zones blanches) | Pas d'implantation possible<br>Calcul du point non garanti avant traitement |                                                                                              |
|                                                       |                                                                                      |                                                                                                                                                                             | Lors du lever : Surveillance poussée des conditions d'acquisition (sauts de cycle, constellation) |                     |                                                                                      | Calcul de courtes lignes de base uniquement (<5 km)                         |                                                                                              |
|                                                       |                                                                                      |                                                                                                                                                                             |                                                                                                   |                     | Stabilité et surveillance du pivot                                                   |                                                                             | Lors du levé : Mise en station irréprochable et surveillance de la stabilité des équipements |
| Avantages                                             | Simplicité de mise en œuvre                                                          | Fonctionne partout en UHF                                                                                                                                                   | Pas de limitations télécoms                                                                       |                     | Bon compromis simplicité de mise en œuvre/précision                                  | Temps d'occupation réduit                                                   | Précision et exactitude « ultimes »                                                          |

Figure 8 : Descriptif des fiches [Legros, 2013].

## 1.3. Quelques exemples de canevas géodésiques et altimétriques

### 1.3.1 En France

#### 1.3.1.1 Le Cher [Delbard, 1988]

Dans le Cher, dans le cadre de travaux d'aménagement foncier, le canevas géodésique de l'IGN a dû être densifié. Cependant, du fait de la topographie des lieux, les méthodes habituelles telles que la triangulation n'ont pas suffi à mettre en place tout le canevas. À cette époque, l'une des difficultés était la disponibilité des satellites. En effet, le système GPS n'était pas encore entièrement déployé. La fenêtre d'observation était très courte, pas plus de 4 heures par 24 heures et souvent la nuit. Le nombre de points pris par jour n'était donc pas très élevé, deux à trois points avec un temps d'observation d'une heure pour chaque. Avec cette méthode considérée à ce moment expérimental, 39 points ont été déterminés. Après contrôle de ces résultats en les comparant à des coordonnées obtenues par mesures classiques, les points de canevas ont une précision qui convient à l'utilisation qui en est faite (Écarts moyens de 6 cm en X, 9 cm en Y et 12 cm en Z).

#### 1.3.1.2 Le RGF93

De nombreux articles décrivent la réalisation de ce canevas, notamment [Le Pape, 1991] et [Luzet, 1996].

À partir de 1990, des campagnes de GNSS se sont mises en place pour rénover le canevas de la France. L'ensemble du canevas a été observé par cette méthode. L'exemple de la campagne GNSS pour la mise en place de six sites du Réseau de Référence Français est décrit dans [Le Pape, 1991]. L'ensemble des points du RRF est représenté sur la figure 9. La campagne s'est déroulée en trois étapes :

- Une phase de reconnaissance permettant de choisir l'emplacement des sites.
- Une phase d'observation GNSS intersite. Pour ce faire, quatre récepteurs fonctionnaient en même temps. Chaque point a donc été observé en moyenne 32 heures par session de quatre heures la nuit. Un rattachement au réseau de nivellement a par la suite été réalisé en nivellement direct.
- Une phase documentaire permettant la réalisation de fiche signalétique, des servitudes, la validation des rattachements sur les sites et le calcul définitif des bases.

La moyenne des précisions relatives obtenue sur les différentes mesures intersites est inférieure à 1 ppm. Ces résultats considérés comme très satisfaisants ont permis de valider cette campagne de GNSS.



Figure 9 : Réseau de Référence français, [Systèmes géodésiques locaux et spatiaux, 2013].

#### 1.3.1.3 Liaison ferroviaire entre Lyon et Turin [Boissenot et al, 2009]

Lors de la réalisation du projet de liaison ferroviaire entre Lyon et Turin, la caractérisation des déformations tectoniques avant travaux ainsi qu'un suivi des déformations du terrain ont été nécessaires. Pour ce faire, la combinaison de plusieurs types de mesures a été réalisée : le tachéomètre, le nivellement direct et le GNSS. Au total, près de 500 points ont été suivis annuellement depuis 1997 dont onze points au GNSS. Ces mesures ont nécessité une grande précision, cinq millimètres en planimétrie et huit millimètres en altimétrie. Pour ce faire, jusqu'à onze récepteurs pouvaient fonctionner en même temps. Chaque point était observé trois fois par session de 24 heures, soit 72 heures d'observation pour un seul point. Par la suite, le traitement des données se faisait avec le logiciel Bernese qui est un logiciel de post-traitement de GNSS développé par l'université de Berne. Un premier ajustement libre du réseau est calculé puis le rattachement en absolu est effectué par l'intermédiaire de stations permanentes. De plus, pour avoir de meilleurs résultats en altimétrie, une grille de conversion altimétrique locale a été réalisée.

#### 1.3.1.4 Compagnie du Rhône [Mure, 2012]

Le canevas français est aujourd'hui en perpétuel changement. En effet, la densification de ce dernier se fait localement par des organismes compétents. On peut citer comme exemple [Mure, 2012]. Dans ce mémoire de fin d'études, la Compagnie Nationale du Rhône a densifié son canevas planimétrique par GNSS et le canevas altimétrique sera réalisé plus tard, par nivellement direct. Pour observer les points de référence au GNSS, plusieurs recommandations ont été faites. Les masques de chaque point ont été relevés, un angle de coupure de  $10^\circ$  a été entré dans l'appareil afin qu'aucun signal GNSS ayant un angle en dessous de cette valeur ne soit analysé. Des précautions ont également été prises lors des observations, la hauteur d'antenne a été mesurée deux fois avec des moyens différents pour éviter toutes erreurs, des fiches d'observation ont été mises en place pour chaque station et les points ont été observés si possible trois fois 1 h 30.

Des sessions aller-retour ont également été réalisées avec un recouvrement entre ces dernières. Du fait du nombre important de techniciens à disposition (une dizaine), chaque point a été mesuré par différentes personnes, ce qui peut éliminer des erreurs dues à l'opérateur et/ou au matériel. Avec toutes ces précautions, la précision fixée de 1,5 cm en planimétrie sur les points de canevas a été assurée.

## 1.3.2 À l'étranger

### 1.3.2.1 Suisse [Varidel & Chapuis, 2002]

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un travail de fin d'études en 2001 pour la filière de géomatique de l'EIVD<sup>14</sup>. Le but de ce travail a été d'étudier la faisabilité, la précision et la fiabilité des mesures de nivellement GNSS et leur utilisation dans un réseau altimétrique de précision. Pour ce faire, deux antennes au sol ont été mises en place à partir de point de nivellement situé sur des bâtiments. Ils ont été rabattus au sol par nivellement géométrique de précision (situé de 10 à 250 m du point d'origine du bâtiment). Les deux antennes sont distantes au maximum de 10 km. La figure 10 explique ce principe.

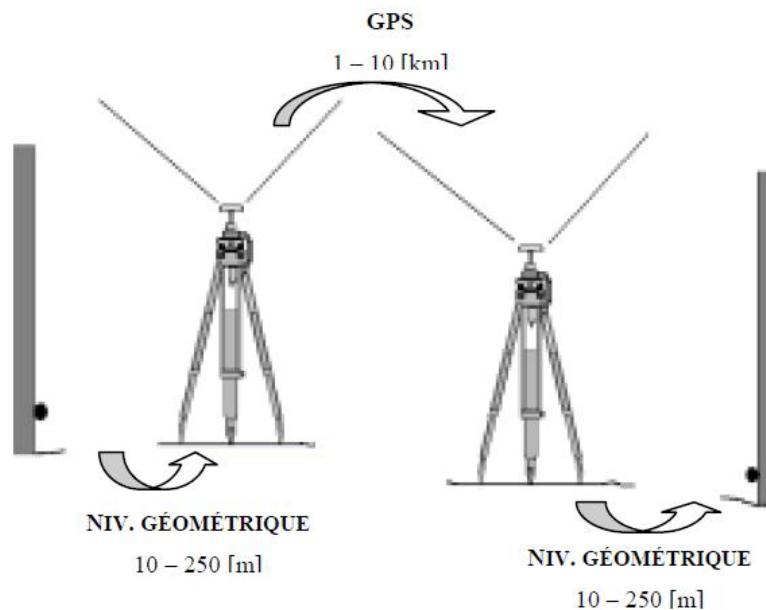


Figure 10 : Schéma de principe du nivellement pas GNSS, [Varidel & Chapuis, 2002].

Pour obtenir une précision sub-centimétrique sur les altitudes, différentes configurations d'observations GNSS ont été mises en place. Il en ressort que la géométrie de la constellation (valeur du GDOP) et le temps de mesure sont les principaux paramètres de la qualité des résultats.

### 1.3.2.2 Algérie [Ben Ahmed Daho, 2003]

En Algérie, la mise en place d'un canevas altimétrique par GNSS a été étudiée dans [Ben Ahmed Daho, 2003]. En effet, l'étendue du territoire algérien étant très importante, le sud du pays ne possédait que très peu de repères de nivellement, notamment au niveau du Sahara.

<sup>14</sup> École d'ingénieurs du Canton de Vaud

En 2003, le réseau comportait 6 500 km de nivellement de 1<sup>er</sup> ordre et 18 000 km d'ordres différents. Dès 1998, douze points GNSS ont été mis en place pour réaliser des passages entre le système WGS 84 et le système local de référence. Ces points ont été observés pendant 72 heures, puis traités avec le logiciel Bernese et des éphémérides précises. Ces points forment désormais le réseau d'ordre zéro de l'Algérie. Depuis, 1 600 points ont été mis en place pour densifier le premier réseau, chaque point est distant de 20 à 30 km et s'appuie sur les points du réseau d'ordre zéro.

Pour étudier la faisabilité du nivellement par GNSS, des modèles de géoïde ont été testés sur 144 stations. En effet, deux modèles étaient à leur disposition sur la zone concernée :

- Le QGALG 2000 qui est un modèle de quasi-géoïde réalisé au Laboratoire de Géodésie du Centre National des Techniques Spatiales (Arzew/Algérie). Il a été déterminé grâce aux données gravimétriques terrestres validées et fournies par le Bureau Gravimétrique International (B.G.I.).
- Le EANG1 (Europe – Afrique du Nord Géoïde N° 1) qui est une réalisation du Bureau Gravimétrique International. Il a été déterminé grâce aux anomalies gravimétriques à l'air libre. Elles ont été obtenues à partir de données gravimétriques terrestres, maritimes et de données d'altimétrie satellitaire.

Ces deux modèles ont été adaptés pour avoir la même référence que celle du nivellement direct par une transformation de similitude à quatre paramètres (trois translations et un facteur d'échelle).

Une comparaison entre l'adaptation de ces deux géoïdes et le nivellement par GNSS sur certains points a été réalisée et est présentée sur la figure 11. Ces résultats prouvent seulement que l'ajustement est optimum.

|            | Moyenne (m) | Maximum (m) | Minimum (m) | Emq (m) |
|------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| QGALG 2000 | 0.000       | -0.043      | 0.059       | 0.075   |
| EANG1      | 0.000       | -0.120      | 0.162       | 0.206   |

**Figure 11 : Résultats de comparaison après ajustement entre les hauteurs du géoïde gravimétrique et les hauteurs déterminées par GNSS/nivellement, [Ben Ahmed Daho, 2003].**

Le QGALG 2000 est donc le modèle ayant le meilleur ajustement, c'est pour cela que 109 points de contrôle ont été relevés avec ce modèle et que des statistiques sur les écarts ont été réalisées. L'analyse de ces résultats montre que 89 % des résultats se trouvent dans un intervalle de  $\pm 5$  cm.

Les conclusions de cette étude menée en 2003 montrent que l'utilisation conjointe du modèle de géoïde QGALG 2000 et des mesures GNSS permet de fournir des altitudes orthométriques avec une précision acceptable, mais pas assez bonne pour occulter le nivellement direct de précision. Néanmoins, cette méthode permettra de couvrir l'ensemble du pays en repère de nivellement.

#### 1.3.2.3 Maroc [El Fettah, 2003]

Un réseau géodésique fondamental a été redéfini au Maroc suite au constat de vieillissement de ce dernier et à certains problèmes tels que :

- La diversité et la multiplicité des systèmes locaux.
- Les variations de précision d'un système à l'autre.
- L'imprécision des paramètres de transformation entre les différents systèmes locaux.
- La disparition de certains points géodésiques et la difficulté d'accès sur d'autres.
- L'absence de canevas géodésique dans le sud du pays.

Le réseau de triangulation du Maroc avant sa redéfinition est présenté figure12.

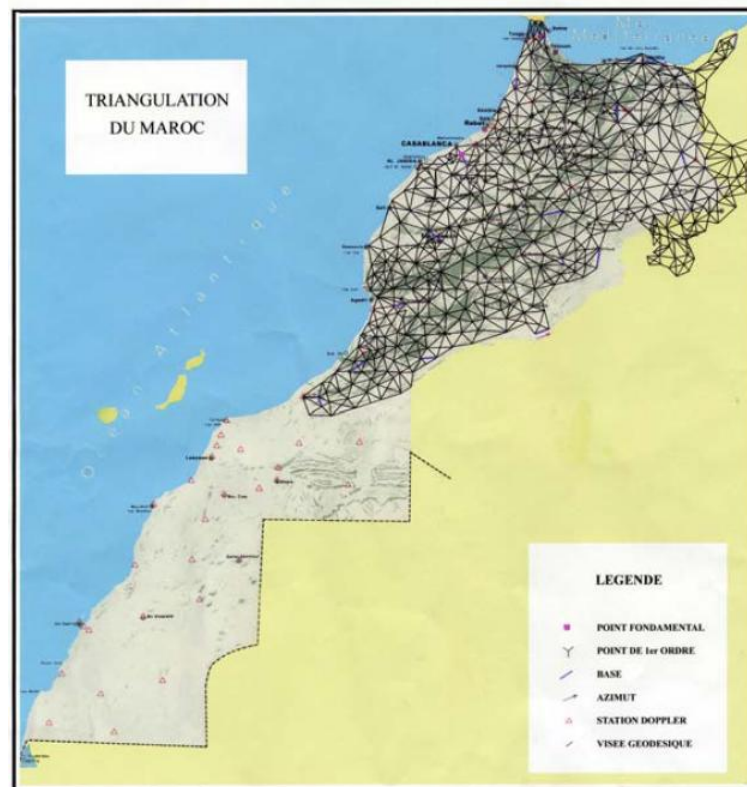


Figure 12 : Réseau de triangulation du Maroc, [El Fettah, 2003].

Le nouveau réseau est basé sur l'ITRF et est exclusivement observé par GNSS. Le réseau de nivellement est quant à lui densifié par méthode de nivellement direct de précision. Ce nouveau réseau est composé de trois sous-réseaux :

- Le Réseau de Référence Marocain (RRM), constitué de 24 points géodésiques espacés de 300 km environ. Il est déterminé à partir des stations GNSS permanentes internationales. Chaque station a été observée en trois sessions intercalées d'une journée avec un temps d'observation de 24 heures chacune. Le traitement a été réalisé avec le logiciel Bernese par le Service de la Géodésie qui a été préalablement formé à l'université de Bern sur ce logiciel. Ils ont obtenu une erreur moyenne quadratique d'un centimètre sur les coordonnées.
- Le Réseau de Base Marocain (RBM) est constitué de 1 300 points géodésiques rattachés aux points du RRM, espacés de 30 à 40 km. Il a été déterminé en s'appuyant sur le Réseau de Référence Marocain et sur les stations permanentes nationales et internationales. Chaque station a été observée en deux sessions de quatre heures.
- Le Réseau Complémentaire Marocain (RCM) a une densité qui varie en fonction des besoins des différents utilisateurs avec un espacement inférieur à 15 km. Il s'appuie sur le Réseau de Référence et de Base ainsi que sur des stations permanentes. Chaque station a été observée 45 à 60 minutes en une seule session.

Le Réseau de Référence Marocain et le Réseau de Base Marocain sont représentés sur la figure 13.

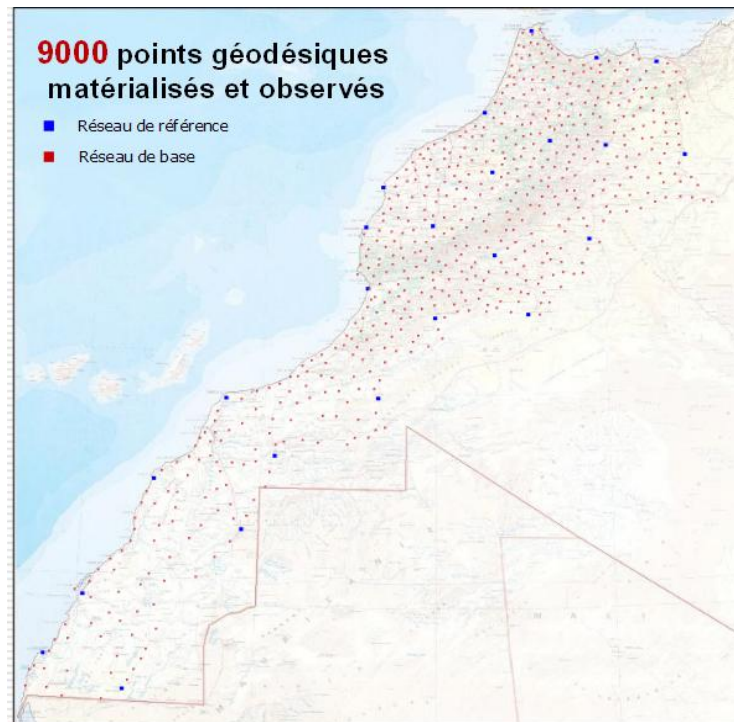


Figure 13 : Réseau de référence et de base au Maroc, [Dazir, 2011].

#### 1.3.2.4 Israël [Tuchin et al, 2009]

Depuis un nouveau règlement qui a été mis en place en 2007, un nouveau système a été défini et l'ensemble du canevas doit s'appuyer sur des mesures GNSS de précision (1 à 2 cm). [Tuchin et al, 2009]. Ce dernier est composé de trois niveaux différents. Le premier (G0) est constitué de 19 antennes permanentes, le second (G1) comprend 150 points définis précisément et le dernier (G2) est composé de 778 points qui ont besoin d'être redéfinis. La figure 14 représente l'ensemble de ces points. Pour ce faire, les points du G1 ont été observés de 2 heures (ligne de base de 20 à 40 km) à 3 heures (ligne de base supérieure à 40 km). Quant aux points du G2, ils ont été observés 40 minutes ou 60 minutes pour des lignes de base respectivement de moins de 10 km et entre 10 km et 20 km.

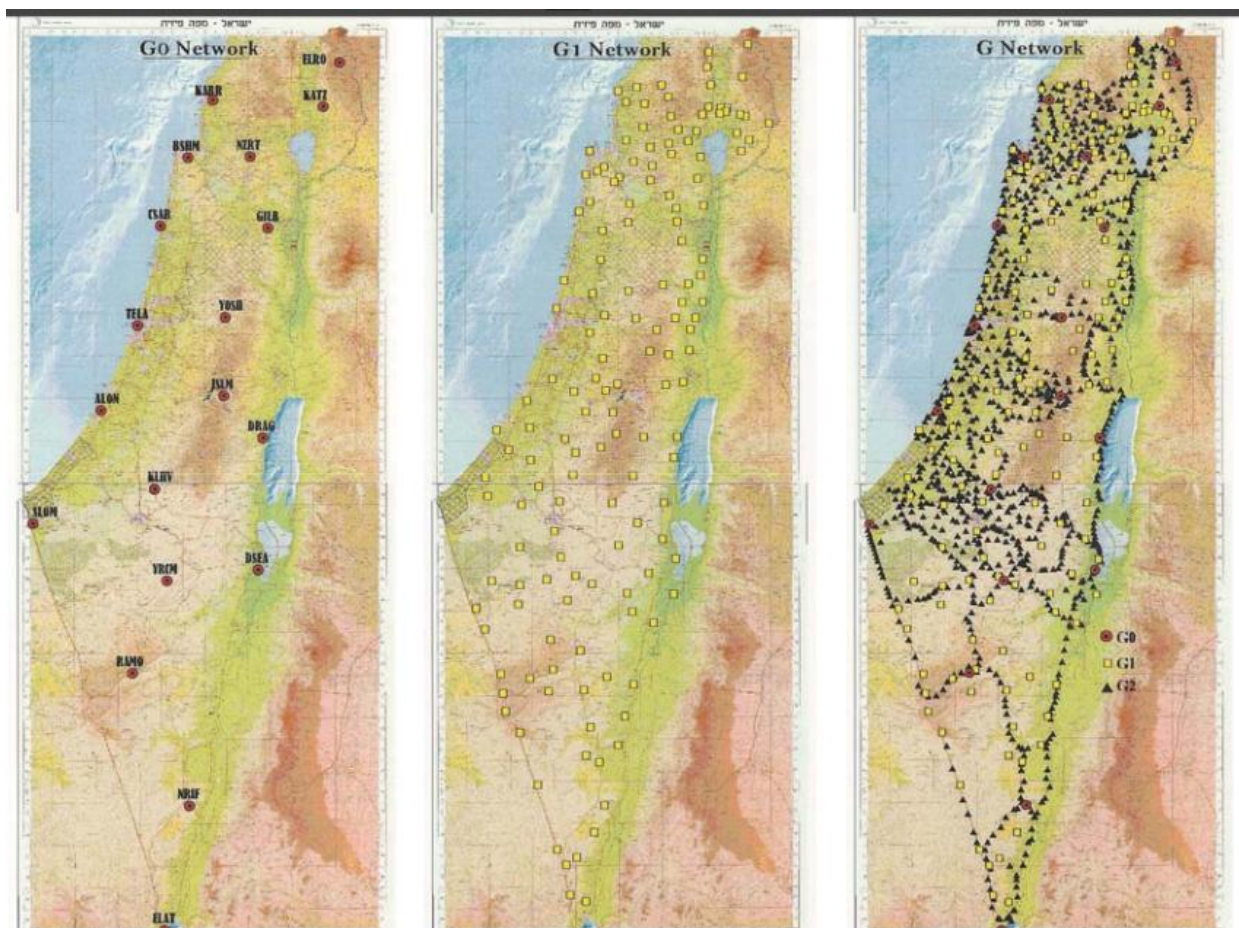


Figure 14 : Canevas Israélien, [Srebro, 2009].

L'ensemble des mesures a été divisé en boucle et chaque boucle est composée de ligne de base. Un exemple de boucles est présenté figure 15. Une ligne de base est donc constituée de deux points consécutifs qui ont été observés en même temps.

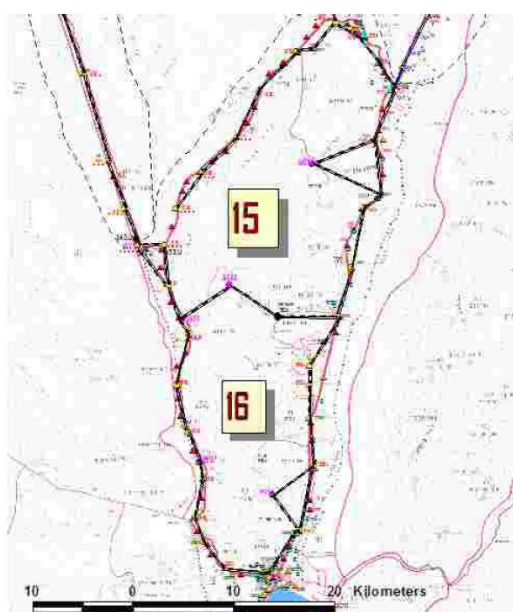


Figure 15 : Boucles 15 et 16, [Tuchin et al, 2009].

Avec cette technique, Israël possède désormais un canevas horizontal avec une précision de 1 à 2 centimètres. La précision altimétrique de ces points était également de l'ordre de 1 à 2 centimètres. Pour augmenter cette précision, un nouveau réseau a été créé sur la base de 700 points de différents ordres et relevés au GNSS en prenant en compte le modèle du géoïde local. Les résultats sont les suivants : une précision altimétrique de 5 mm pour les points du GO, 10 mm pour les points du G1 et 20 mm pour les points du G2 [Srebro, 2009].

D'autres exemples peuvent également être cités [Duquenne et al, 2005a] pour la Belgique, [Miller et al, 2009] pour les îles Barbades [Abeyratne et al, 2010] pour le Sri Lanka [Cheng et al, 2009], [Amos & Featherstone, 2009] pour la Nouvelle-Zélande et [Wang et al, 2012] pour la Chine.

Enfin, pour conclure la partie sur les mesures GNSS, selon [Zggai et al, 2006] « la précision sur les altitudes orthométriques déterminées par la technique GPS/Nivellement reste tributaire de :

- La fiabilité des données gravimétriques et du modèle de calcul du géoïde (local ou global).
- La précision des mesures GPS et la puissance du logiciel de traitement.
- La qualité du réseau de nivellement.
- Du modèle de surface de correction ou d'adaptation du géoïde aux points GPS-nivelés.
- Les inconsistances des datums propres aux différents types d'altitudes.
- La densité et la répartition géographique des points de référence. »

## 1.4. Conclusion

Les canevas sont nécessaires pour la bonne réalisation des travaux topographiques. Nous avons pu voir que deux principaux canevas existent en France : le RGF93 pour la planimétrie et le NGF pour l'altimétrie. Les techniques de mise en place de ces derniers n'ont guère évolué pendant des années. Cependant, l'apparition des techniques GNSS ces dernières années a permis de moderniser leur réalisation. En effet, de nombreux canevas géodésiques sont désormais réalisés avec cette technique. Enfin, nous avons pu voir que la réalisation de canevas altimétrique avec cette méthode est possible, mais est beaucoup plus compliquée à mettre en œuvre pour atteindre une précision sub-centimétrique. Le nivellement direct reste pour le moment la technique la plus facile à utiliser pour déterminer une altitude avec une très bonne précision.



# Partie 2

## CONTEXTE DE L'ÉTUDE

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....                                     | 23 |
| 2.1. Contexte général.....                                   | 23 |
| 2.1.1 Rennes Métropole.....                                  | 23 |
| 2.1.2 Le service SIG .....                                   | 25 |
| 2.1.3 La base de données topographique.....                  | 26 |
| 2.2. Les systèmes de coordonnées « Ville de Rennes » .....   | 26 |
| 2.2.1 Le système géodésique VDR79.....                       | 26 |
| 2.2.1.1 Transformation VDR79/Lambert II .....                | 28 |
| 2.2.1.2 Transformation VDR79/RGF93.....                      | 28 |
| 2.2.1.3 Transformation RGF93/Lambert II .....                | 29 |
| 2.2.2 Le système géodésique REN09 .....                      | 30 |
| 2.2.2.1 Problématique.....                                   | 30 |
| 2.2.2.2 Le système REN09_VDR.....                            | 30 |
| 2.2.2.3 Le système REN09_IGN.....                            | 31 |
| 2.2.2.4 Choix du système géodésique .....                    | 32 |
| 2.2.3 Système altimétrique .....                             | 32 |
| 2.3. Définition des besoins .....                            | 33 |
| 2.3.1 Les besoins en terme de système de coordonnées.....    | 33 |
| 2.3.2 Les besoins en terme de classes de précisions.....     | 34 |
| 2.3.3 Les besoins en terme de canevas .....                  | 35 |
| 2.4. Enquête auprès d'autres collectivités .....             | 35 |
| 2.4.1 Canevas et mise en place.....                          | 35 |
| 2.4.2 Contraintes liées aux transports en commun guidés..... | 36 |
| 2.4.3 Contrôle de l'altimétrie.....                          | 36 |
| 2.5. Conclusion.....                                         | 37 |

Le but de ce chapitre est de présenter le contexte particulier de l'étude. Pour ce faire, le fonctionnement de Rennes Métropole et tout particulièrement celui du service SIG sera présenté. Une description du système géodésique et du canevas actuel sur la Ville de Rennes sera détaillée. Tout cela nous permettra de cerner les futurs besoins de l'ensemble de l'agglomération et de pouvoir ainsi les définir.

### 2.1. Contexte général

#### 2.1.1 Rennes Métropole

La communauté d'agglomération de Rennes Métropole a été créée le 31 décembre 1999 par transformation du district urbain de l'agglomération rennaise qui lui, a vu le jour en 1970.

Vingt-sept communes composaient alors l'agglomération, 38 aujourd'hui et cinq supplémentaires vont rejoindre Rennes Métropole au 1<sup>er</sup> janvier 2014. La figure 16 représente l'ensemble de ces communes. La communauté d'agglomération regroupera alors 43 % de la population de l'Ille-et-Vilaine pour un budget d'environ 544 millions d'euros.

Rennes Métropole dispose de compétences étendues qui concernent principalement le développement économique, les études et projets d'urbanisme, le logement, l'habitat et les services urbains (Transports, déchets, crématorium et équipements sportifs et culturels d'intérêt communautaire).

Cent onze élus des différentes communes de Rennes Métropole siègent au conseil d'agglomération qui emploie un peu plus de 1 000 agents.

Depuis le 1er janvier 2010, une politique de mutualisation des services a permis de regrouper la quasi-totalité des services fonctionnels de Rennes et Rennes Métropole (communication, SIG, informatique, juridique, culture, aménagement urbain, Ressources Humaines...). Ces services mutualisés travaillent pour les deux collectivités, dans un souci de cohérence et de rationalisation de l'action publique. La mutualisation permet donc de mettre en commun les ressources et les moyens de la Ville de Rennes et de la communauté d'agglomération afin de proposer des services de meilleure qualité aux usagers. En effet, l'espace de vie des citoyens, travail, domicile, loisirs, ne se limite plus aux frontières communales. La mutualisation traduit donc dans les organisations ces changements.

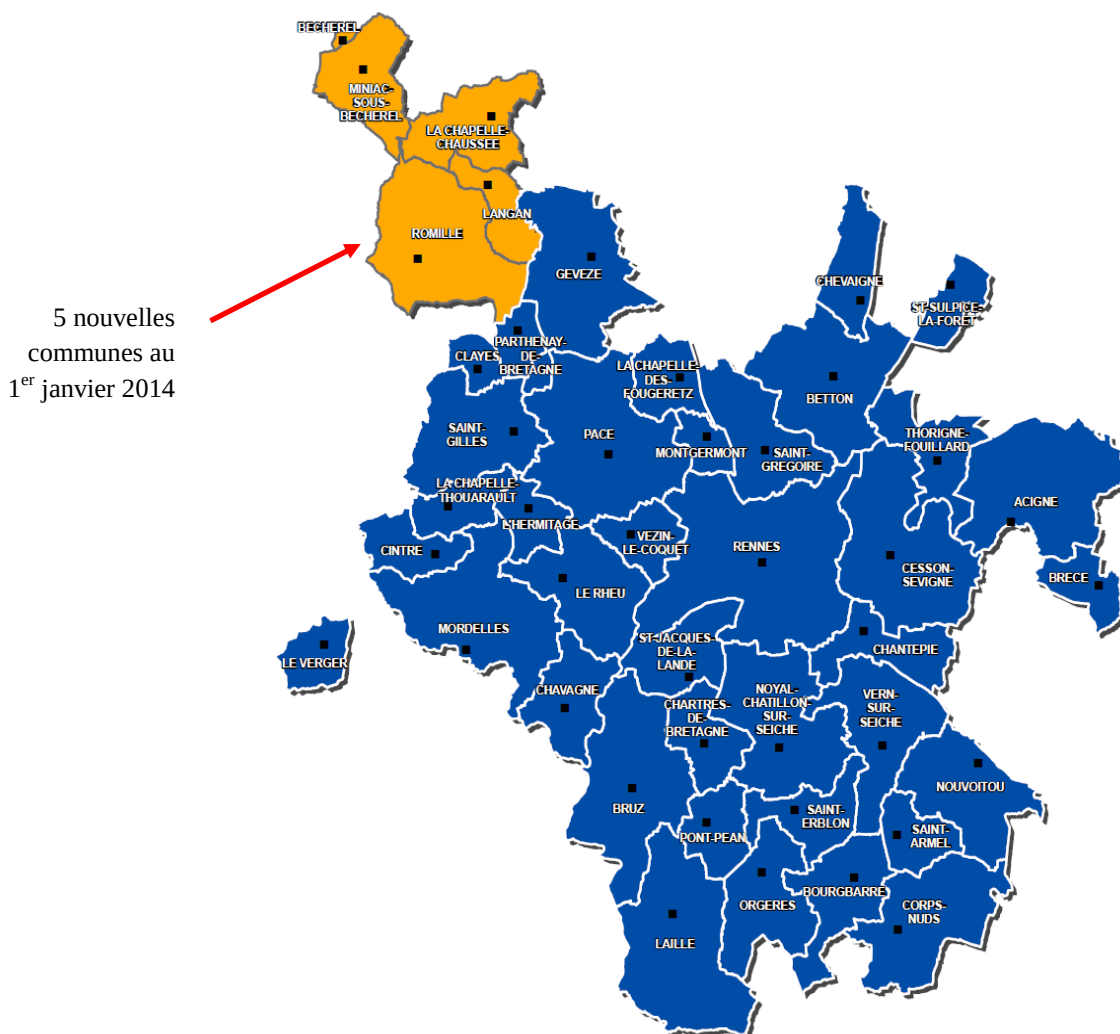


Figure 16 : Carte des communes de Rennes Métropole.

### 2.1.2 Le service SIG

Depuis 1974, un service de cartographie et de topographie est présent au sein de la Ville de Rennes pour mettre en place la cartographie de la ville. Après la mutualisation au 1<sup>er</sup> janvier 2010, la zone de compétence s'est étendue à l'agglomération. Pour répondre à l'ensemble des sollicitations, quatre pôles ont été créés au sein du service soit 30 agents.

- Le pôle Administratif : il élabore le budget avec les autres pôles et suit l'ensemble des marchés et des dossiers administratifs.
- Le pôle Études et Développements : il gère et développe les bases de données ainsi que les logiciels, et réalise des développements web.
- Le pôle Cartographie Diffusion 2D/3D : il assure la maîtrise d'ouvrage des projets d'acquisition et d'évolution des bases de données SIG 2D et 3D. Il élabore et veille à l'application de la politique de diffusion des données géographiques. Enfin, il aide les utilisateurs de données et apporte des outils d'aide à la décision.
- Le pôle Données Topographiques : il construit et garantit la cohérence des données topographiques. Il construit et maintient également la Base de Données Topographiques (pilote et acquiert les données de surface de précision ainsi que les données de sous-sol). Enfin, il peut offrir une expertise (auscultation de barrages, analyse de données lidar, contrôle de canevas de précision, etc.).

Plusieurs conventions ont été passées dans le domaine de prestations topographiques et d'acquisition/diffusion de données :

- Les conventions d'échange de données : avec les partenaires institutionnels (Police Nationale, Institut d'aménagement de la Vilaine, échange entre la Ville de Rennes et Rennes Métropole).
- Les conventions d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour travaux topographiques : avec la SEMTCAR<sup>15</sup> pour un accompagnement topographique de la seconde ligne de métro, ou bien encore avec le CHU<sup>16</sup> Pontchaillou pour la réalisation de levés topographiques...
- Les conventions d'acquisition de données : acquisition de l'orthophotographie au niveau régional avec le syndicat e-mégalis
- Les conventions sur la base d'une participation financière à la mise à jour de la base de données topographiques : avec des entreprises telles qu'ERDF, GRDF, Veolia ou le SMPBR<sup>17</sup>.

---

<sup>15</sup> Société d'Économie Mixte des Transports Collectifs de l'Agglomération Rennaise

<sup>16</sup> Centre Hospitalier Universitaire

<sup>17</sup> Syndicat Mixte de Production d'Eau du Bassin Rennais

### 2.1.3 La base de données topographique

La base de données topographiques a été réalisée au sein du pôle données topographiques. Elle a été constituée entre 1987 et 1999 pour les données de surface et est aujourd'hui complètement achevée et régulièrement mise à jour. Les données de sous-sol sont quant à elles complètes à 70 %, tout cela sur la Ville de Rennes. Un canevas dense a été mis en place tout en long de la création de cette base. Il comporte aujourd'hui près de 9 000 stations (emq<sup>18</sup> de  $\pm 1,5$  cm en planimétrie,  $\pm 1$  cm en altimétrie) et 1 500 repères de nivellement (emq de  $\pm 5$  mm) pour un territoire de 50 km<sup>2</sup>.

La base comporte plus de huit millions d'objets. Elle est alimentée en régie, mais aussi par l'intégration des relevés des prestataires à l'issue de contrôles (exhaustivité, structure, classe de précision). Elle a été réalisée au sein du service SIG et prend en compte les impératifs de gestion des autres services. Elle est gérée grâce au logiciel TopStation sur la base de laquelle des outils internes pour faciliter le travail ont été créés.

Nous voyons donc bien qu'une base de travail solide est présente sur la Ville de Rennes mais qu'aujourd'hui elle est inexistante sur le reste de l'agglomération et que tout reste à faire.

## 2.2. Les systèmes de coordonnées « Ville de Rennes »

### 2.2.1 Le système géodésique VDR79<sup>19</sup>

Dès les années 1970, la Ville de Rennes a mis en place une réflexion sur les référentiels géographiques. En effet, la zone applicable à Rennes est à cette époque le Lambert II, ayant une latitude moyenne de 48,06° soit 53,44 gon. La zone d'application va de 50,50 gon à 53,50 gon. Étant en bordure de zone, l'altération linéaire y était élevée atteignant 13 cm par kilomètre. Pour s'affranchir des imperfections de la NTF, assez prononcées en Bretagne, un canevas indépendant associé à une projection plane et minimisant au maximum les altérations a été mis en place, le VDR79 créé en 1979. Il peut être assimilé à une projection stéréographique polaire dont l'orientation Nord serait le nord Lambert.

Les caractéristiques de cette dernière sont décrites dans [Guillopé, 2002] :

- Une orientation suivant le Nord Lambert au centre de la figure.
- Une altération nulle des longueurs.
- Une réduction des distances au niveau de la mer (0,5cm/km).
- Un jeu de coordonnées final très éloigné des coordonnées Lambert II pour éviter toute confusion.
- Le calcul d'une formule de transformation assurant le passage réversible du système local dans le système légal en vigueur.

---

<sup>18</sup> Erreur moyenne quadratique

<sup>19</sup> Ville de Rennes 1979

Pour ce faire, un polygone à point central avec un quadrilatère complet accolé a été créé (figure 17) avec les contraintes suivantes :

- Tous les points de la NTF situés sur le territoire devaient être intégrés dans les observations et calculs.
- Les points nouveaux hors figure seraient déterminés par intersection, relèvement ou recoupement.
- Une polygonale de ceinture à longs côtés serait rattachée aux sommets de la figure (représentant la rocade périphérique de Rennes).
- La mise à l'échelle serait réalisée à l'aide de deux bases grâce à des distance-mètres du service préalablement étalonnés.
- Les observations angulaires seraient réalisées par série de quatre tours avec double retournement et décalage du limbe.

À la fin de son existence, fin 2008, le VDR79 comportait plus de 11 000 stations. Cependant, ce système avait ses limites. En effet, certaines zones de la ville ont été interpolées. Par exemple, la zone située au Nord-Ouest de la ville, se situant à l'extérieur de la rocade, n'est pas encadrée par une polygonale. La précision des points topographiques dans le VDR79 est donc moins bonne entraînant des problèmes de fermeture des cheminements polygonaux effectués au tachéomètre. Des fermetures pouvant aller jusqu'à 20 cm sur des cheminements de l'ordre de deux à trois kilomètres ont pu être observées. Avec le développement des nouvelles technologies et notamment du GNSS, l'utilisation du VDR79 devenait plus contraignante, ce système n'étant pas prévu pour fonctionner avec la technologie GNSS. Enfin, il était également difficile de déclarer le VDR79 dans un système d'information géographique, qui était peu répandu à l'époque de sa création.

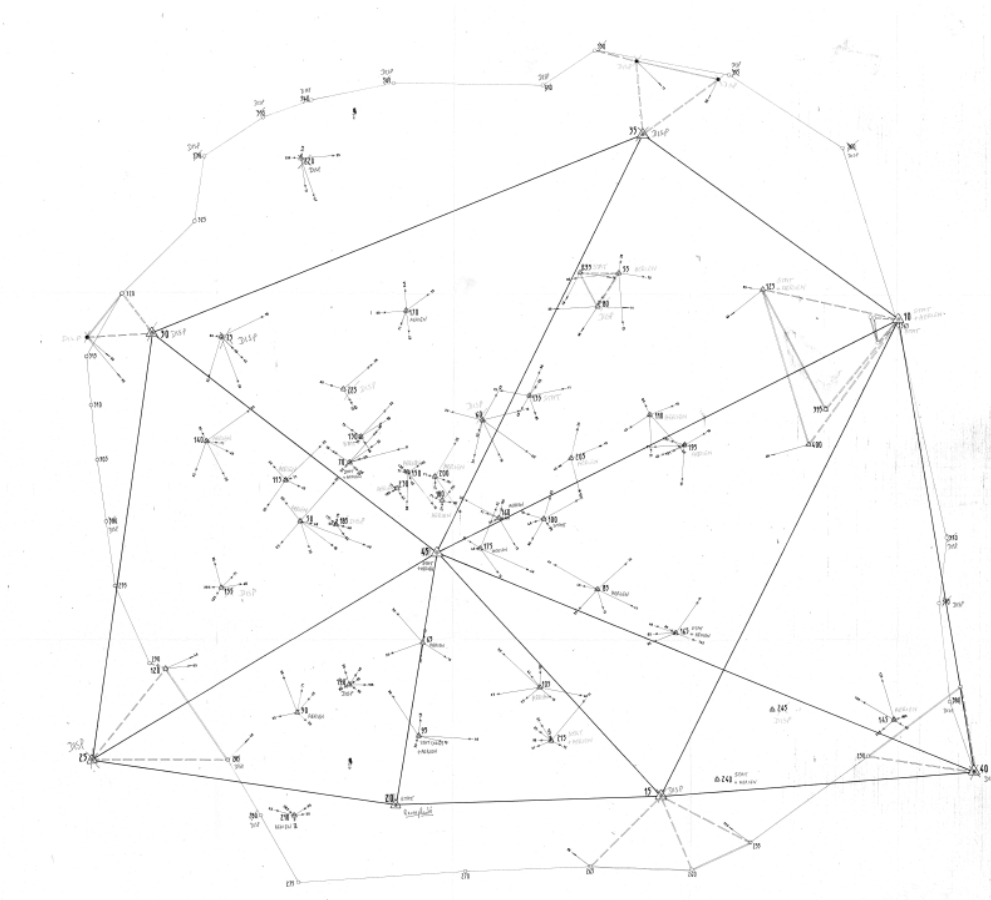


Figure 17 : Schéma de triangulation et de la polygonale de la Ville de Rennes pour la mise en place du VDR 79.

### 2.2.1.1 Transformation VDR79/Lambert II

Pour permettre la compatibilité du VDR79 avec le Lambert Zone II, une formule de transformation a été réalisée dès sa création. Une adaptation polynomiale du troisième degré a été mise en place. Pour ce faire, des points doivent être connus dans les deux systèmes, seules les coordonnées planes ont été employées. Ici, onze points ont été utilisés pour déterminer les paramètres. Les équations sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Équation 1} \quad & x = (X - X_0)10^{-6} & y = (Y - Y_0)10^{-6} \\ X_1 = U_0 + P.x - Q.y & \text{ Avec : } & P = U_1 + M.x + N.y & Q = V_1 + N.x + M.y \\ Y_1 = V_0 + Q.x - P.y & & M = U_2 + U_3.x + V_3.y & N = V_2 + V_3.x + U_3.y \end{aligned}$$

Dans la transformation allant du VDR79 au Lambert II, ces paramètres ont pour valeurs :

$X_0 = 32970.000 \text{ m}$ ,  $Y_0 = 51700.000 \text{ m}$ ,  $U_0 = 300998.584$ ,  $V_0 = 352751.434$ ,  $U_1 = 1000130.344$ ,

$U_2 = 855.807$ ,  $U_3 = -364423.848$ ,  $V_1 = 0.572$ ,  $V_2 = -1944.356$ ,  $V_3 = 298606.358$

Lors du calcul de ces paramètres, les coordonnées VDR79 ont été considérées comme justes pour ne pas perdre de la qualité du canevas. Aucune transformation ne permet d'associer exactement ces coordonnées VDR79 au système légal. Un Lambert II local a donc été créé : le Lambert II Rennes. En effet, il a fallu adapter les coordonnées Lambert II au VDR79 et non l'inverse du fait de la très bonne qualité du canevas de la Ville de Rennes. Après transformation en Lambert II Rennes et contrôle, les écarts avec le Lambert II légal ne dépassent pas 4 cm, ce qui a été jugé suffisant à l'époque.

### 2.2.1.2 Transformation VDR79/RGF93

En 2002, a été mise en place au sein du service SIG une nouvelle transformation permettant le passage du VDR79 au RGF93 et inversement. Elle a pu être réalisée grâce à une campagne GNSS.

Les points du canevas principal encore existants ayant servi à la réalisation du VDR79 ont été observés pendant au minimum deux sessions d'au moins une heure et à des jours différents (17 points connus en planimétrie et 7 en planimétrie-altimétrie).

Du fait que le système VDR79 est un système sans référence géodésique, la transformation doit se réaliser en coordonnées planes. Grâce au logiciel SKI-PRO de Leica, une projection type UTM locale a été définie pour déterminer ces coordonnées. Le système de coordonnées a été défini avec les paramètres suivants :

- Ellipsoïde : WGS84 (assimilé pour la suite au IAG\_GRS80).
- XYZ : orientation du repère celui du RGF93.
- Projection : Mercator Transverse.
- Méridien central (ligne de tangence à la surface) : méridien du centre de gravité des 24 points communs,  $1^\circ 40' 12,94275$  (le centre de gravité des 24 points peut être considéré comme un point fondamental du système).
- Méridien origine (axe des « X » de la projection) : méridien central.

Par la suite, une transformation du type Helmert 2D a permis d'adapter le RGF93 au VDR79 avec une précision moyenne de 1,4 cm en planimétrie et 0,6 cm en altimétrie.

Les équations sont les suivantes :

$$E_{VDR} = E_0 + \Delta E + \mu [ (E_{UTMloc} - E_0) \cos \theta + (N_{UTMloc} - N_0) \sin \theta ]$$

$$N_{VDR} = N_0 + \Delta N + \mu [ - (E_{UTMloc} - E_0) \sin \theta + (N_{UTMloc} - N_0) \cos \theta ]$$

Avec :

$$E_0 = -0.0619 \text{ m}, N_0 = 0.4189 \text{ m}, \theta = 10513.62583'', \Delta E = 33680.2434 \text{ m}, \Delta N = 52102.9710 \text{ m}, \mu = 1.0000071593$$

La qualité des résultats et la répartition des résidus sans homogénéité ont conduit à retenir cette adaptation directe au détriment d'une éventuelle grille de correction. Cependant, la transformation étant composée de deux éléments, une projection et une Helmert 2D, le paramétrage est difficile au sein d'un logiciel de SIG. Cette transformation est donc simplement un moyen pour utiliser les méthodes GNSS.

### 2.2.1.3 Transformation RGF93/Lambert II

Avant l'apparition du RGF93, les géomètres experts travaillaient aussi bien en VDR79 qu'en Lambert II Rennes. Du fait de l'essor du GNSS, ces derniers pouvaient obtenir des coordonnées RGF 93 et les transformer grâce à une grille de transformation (GR3DF97A) en Lambert II légal et non Lambert II Rennes. Cependant, il existait des différences notables entre les deux systèmes (jusqu'à 10 cm).

La coexistence de ces deux systèmes Lambert posait donc des problèmes et a été résolue par la création d'un nouveau système (cf § 2.2.2).

La figure 18 reprend l'ensemble des systèmes coexistant sur le Ville de Rennes avant la mise en place du REN09.

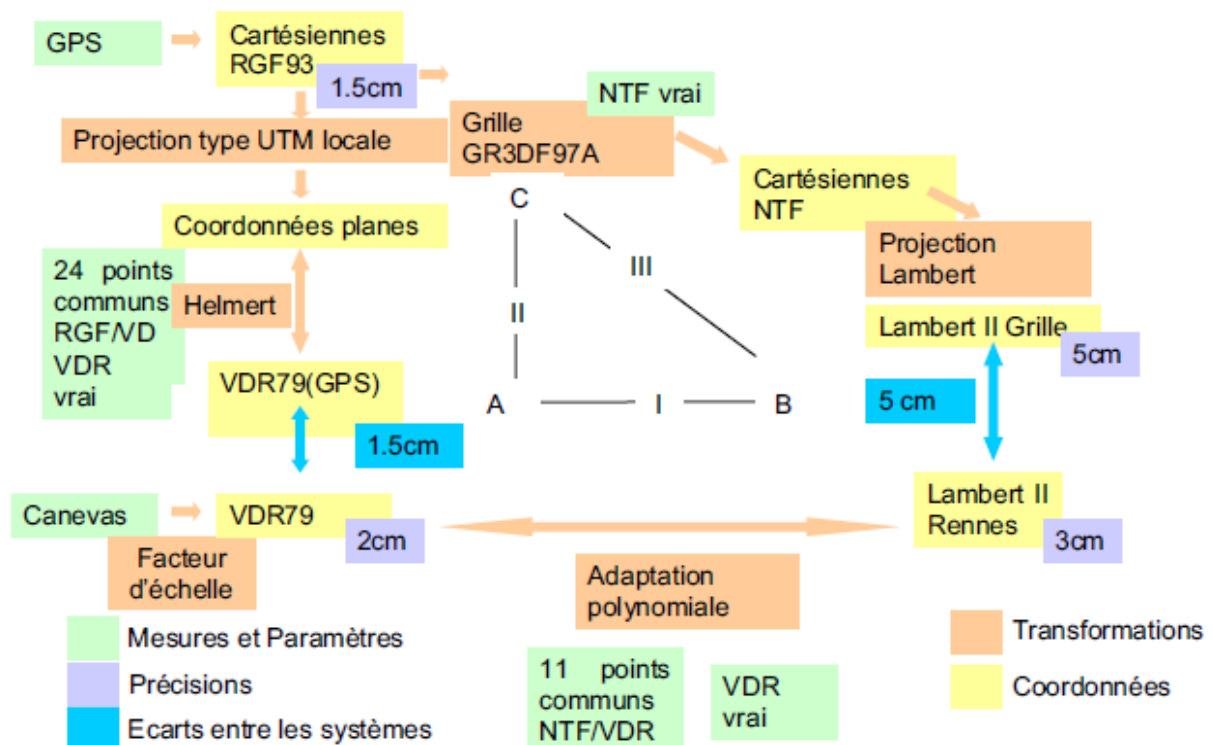


Figure 18 : Systèmes de coordonnées utilisés à Rennes avant 2009 [Guillot, 2008].

## 2.2.2 Le système géodésique REN09

Suite à la nouvelle réglementation de 2000, le nouveau système en vigueur est le RGF93, applicable à la place de la NTF à partir de 2009. L'un des buts de ce nouveau système géodésique national est de disposer d'un ensemble de points géodésiques plus précis, non entaché d'erreurs dues aux méthodes utilisées lors de la mise en place de la NTF. Cependant, le territoire de la Ville de Rennes possède encore une altération linéaire de 8 cm par kilomètre en RGF93 CC48. Étant donné l'altération linéaire nulle du VDR79, il a été décidé en 2009 de travailler sur la Ville de Rennes, pour ses données opérationnelles, avec un nouveau système qui garde cet avantage, le REN09. Pour ses données de gestion, le RGF93 avec la projection conique conforme associée sera le système utilisé. Deux solutions ont été mises en œuvre, une par le service SIG de la Ville de Rennes (REN09\_VRD) et une autre par l'IGN (REN09\_IGN).

### 2.2.2.1 Problématique

Pour faciliter le basculement des données et garder les avantages du VDR79, il a été décidé d'utiliser un système géodésique et une projection qui se rapproche le plus possible des caractéristiques de ce dernier. Pour cela :

- La différence d'altitude entre la surface de référence du VDR79 et celle de l'ellipsoïde du nouveau système géodésique devra être minimale pour ne pas introduire de facteur d'échelle.
- La nouvelle projection devra comme le VDR79 avoir une altération linéaire minimale.
- Le Nord du VDR79 (Nord Lambert 2 sur Rennes) devra être conservé.
- Le nouveau système devra être paramétrable sur les principaux logiciels exploités.

### 2.2.2.2 Le système REN09\_VDR

#### 2.2.2.2.1 Caractéristiques

Ce système de coordonnées a été déterminé par la Ville de Rennes au sein du service SIG.

Le système de référence géodésique est la NTF avec une transformation standard ayant pour paramètres  $T = (TX, TY, TZ) = (-168,000 \text{ m}, -60,000 \text{ m}, +320,000 \text{ m})$ .

L'ellipsoïde de référence retenu est le Clarke 1880 IGN dont la surface est proche du niveau 0 du géoïde à Rennes. La figure 19 illustre ces écarts.

L'ellipsoïde IAG\_GRS80 aurait aussi pu convenir, mais celui-ci étant plus éloigné du géoïde, il aurait fallu l'« augmenter » d'un facteur d'échelle de 7.5 ppm, ce qui n'était pas paramétrable directement sur certains SIG.

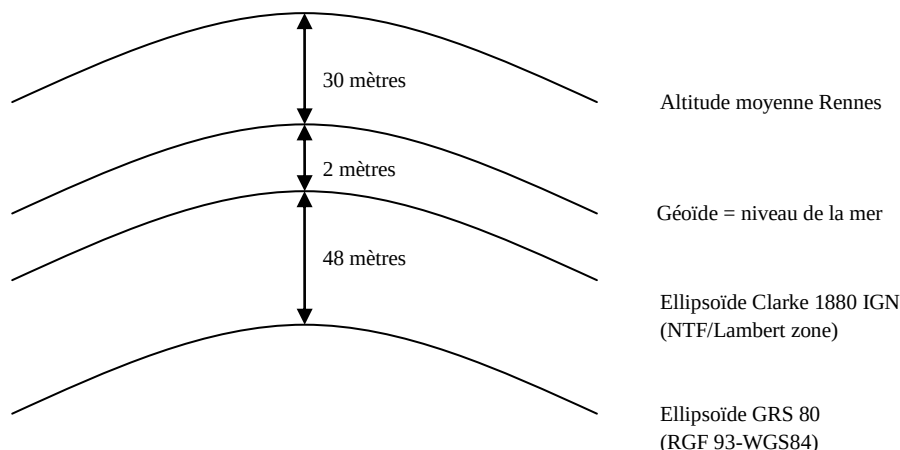


Figure 19 : Comparaison du Géoïde et des ellipsoïdes à Rennes.

La projection la plus équilibrée sur Rennes Métropole en terme d'altération linéaire moyenne minimale s'avère être une projection conique conforme sécante de type Lambert.

La latitude pour le parallèle origine est de 48°06'N (centre de Rennes Métropole et quasi-centre de Rennes) et de 48°00' et 48°12' pour les parallèles automécoïques.

Le méridien origine de la projection est 2°15'12.36''E permet ainsi de conserver le nord VDR79. Une représentation de la projection est réalisée figure 20.

Un offset X0, Y0 a été choisi arbitraire pour ne pas confondre le VDR79 et le REN09\_VDR.  
X0 = 340 000, Y0 = 60 000.

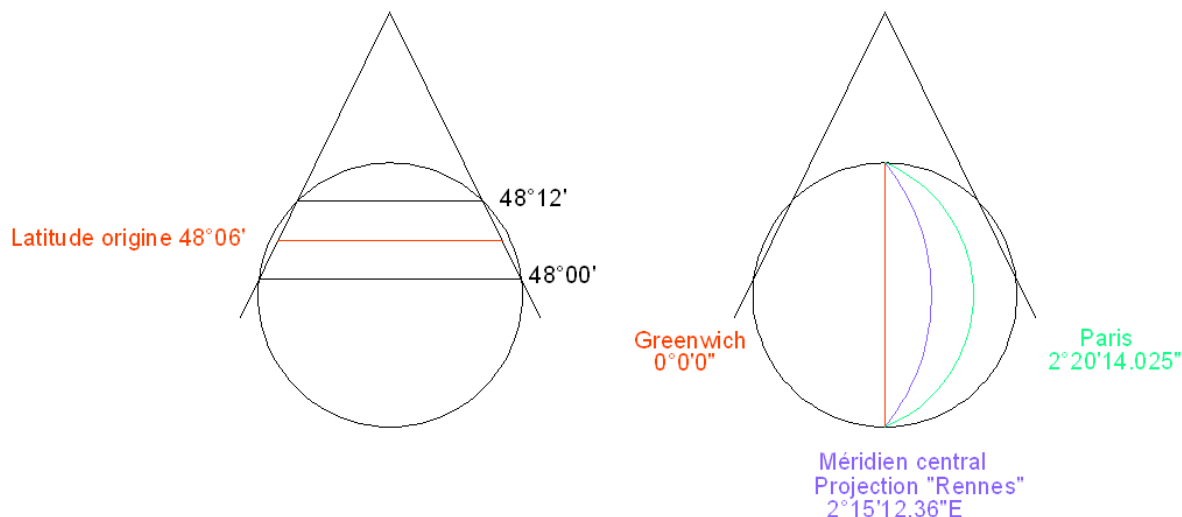


**Figure 20 : Projection conique conforme de Rennes.**

Le choix de tous ces éléments rend le REN09\_VDR très simple à paramétrer dans les logiciels utilisés.

#### 2.2.2.2.2 Altération linéaire des distances liées à la projection conique conforme sécante

L'altération linéaire ne dépasse pas 2 mm/km au sein de Rennes métropole, comme illustré figure 21.

| Altération linéaire (en mm par km) |       |                      |               |              |                  |                |                       |       |
|------------------------------------|-------|----------------------|---------------|--------------|------------------|----------------|-----------------------|-------|
|                                    |       | Sud "pays de Rennes" | Sud Métropole | Origine CC48 | Origine "Rennes" | Nord Métropole | Nord "pays de Rennes" |       |
| Latitude                           | 47°   | 47°55                | 47°57         | 48°00        | 48°06            | 48°15          | 48°25                 | 49°   |
| Altération linéaire CC48           | 66,5  | -84,3                | -85           | -85,4        | -84              | -76            | -59                   | 66,5  |
| Altération linéaire REN09          | 182,2 | 3,5                  | 1,9           |              | -1,5             | 1,9            | 13,7                  | 121,5 |

**Figure 21 : Valeurs de l'altération linéaire en CC48 et REN09 [Guillopé, 2008].**

#### 2.2.2.3 Le système REN09\_IGN

La solution proposée par la Ville de Rennes a été validée par l'IGN. Cependant, ils ont également proposé une solution alternative [Harmel, 2008].

Le système de référence n'est plus la NTF mais le RGF93 avec une transformation standard ayant pour paramètre  $T = (TX, TY, TZ) = (32,276 \text{ m}, -0,941 \text{ m}, 35,999 \text{ m})$ . Ce système est fixé de telle manière que l'ellipsoïde retenu (IAG\_GRS80) soit tangent à la surface d'altitude 0.

L'ellipsoïde de référence est désormais le IAG\_GRS80.

Enfin, la projection est également une projection conique conforme avec une latitude du parallèle à l'origine de 48°06' et de 48°03'16.836'' ainsi que 48°09'48.750'' pour les parallèles automécoïques. Quant à elle, la valeur du méridien origine est de 2°15'10.346''.

#### 2.2.2.4 Choix du système géodésique

L'altération linéaire a été comparée entre les deux systèmes. Un écart maximum de 2 mm par kilomètre a été observé. Cet écart reste acceptable du fait de la précision centimétrique des données. Ces écarts sont représentés figure 22.

#### altérations linéaires

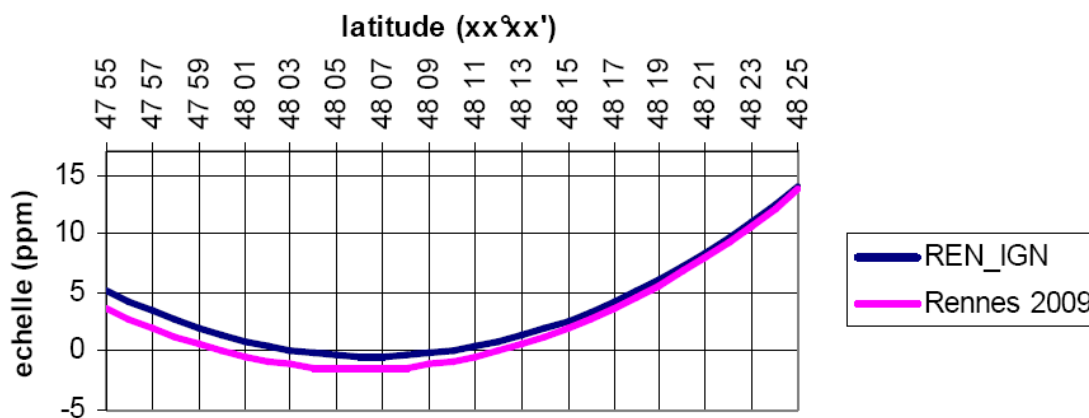


Figure 22 : Altération linéaire du REN\_IGN et Rennes 2009 [Harmel, 2008].

Le REN09\_VDR a été préféré au REN09\_IGN pour plusieurs raisons. Le REN09\_VDR était plus simple à intégrer et à paramétrer dans les logiciels. L'altération linéaire était quand même un peu plus faible sur la Ville de Rennes. De plus, le facteur d'échelle lié au REN09\_VDR était moins important que celui lié à la transformation IGN.

Enfin, l'utilisation de l'ellipsoïde de référence IAG\_GRS80 intégrait un déplacement en xyz non standard. Tout cela rendait l'utilisation du REN09\_IGN plus complexe aux utilisateurs. Le nouveau système sera désormais appelé le REN09.

### 2.2.3 Système altimétrique

Le système altimétrique associé au VDR79 est Lallemand et celui du REN09 est l'IGN69. Pour ne pas confondre les deux systèmes, un offset en X et Y a été ajouté aux coordonnées de REN09. En effet, la constante pour passer du système altimétrique Lallemand à l'IGN 69 est de + 0,30 m, ce qui peut engendrer certaines confusions.

## 2.3. Définition des besoins

Une base de données mutualisée topographique de surface et de sous-sol similaire à celle de la Ville de Rennes sur le territoire de l'agglomération est en projet et devrait voir le jour courant 2014. Cette base hébergera les données nécessaires aux services de Rennes Métropole pour rassembler et ainsi mutualiser les données acquises par chacun.

A l'usage des services de Rennes Métropole vient se rajouter celui des communes, au travers du projet appelé « Réseaux Communaux ». Ce projet offrira une plate-forme d'hébergement, et une organisation unique des données aux communes souvent démunies devant une telle tâche. Il permettra également de centraliser les données topographiques de surface ainsi que les données réseaux gérés en régie par les communes. Celles-ci pourront alors satisfaire à leurs obligations réglementaires en terme de DT/DICT<sup>20</sup> et à leur nécessité de gestion du domaine public.

Rennes Métropole n'ayant pas la compétence en matière de voirie, celle-ci ne peut rien imposer aux communes. Elle propose donc un marché commun à ses services et aux communes qui le désirent, pour que celles-ci puissent acquérir, en groupement de commande, des données topographiques et/ou des données réseaux, suivant des spécifications communes.

C'est dans ce contexte de réflexion sur la mise en place de cette base ainsi que du marché topographique que les besoins en terme de système de projection géodésique, de mise en place d'un canevas ainsi que de classes de précision sont analysés.

### 2.3.1 Les besoins en terme de système de coordonnées

Aujourd'hui, l'ensemble des intervenants sur la base topographique de la Ville de Rennes travaille dans le système local REN09. Cependant, avec l'apparition de nouvelles réglementations et de nouveaux projets, la question de l'extension de ce système à l'agglomération et même tout simplement son maintien sur la Ville de Rennes se pose.

En effet, depuis le décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 (complété par le décret n° 2006-272 du 3 mars 2006), le système légal de diffusion en France est le RGF93 ou la projection conique conforme associée. Aujourd'hui, de plus en plus de partenaires peuvent et demandent donc les données de la Ville de Rennes dans ce système légal. Le fait de travailler en REN09 n'est pas illégal mais il n'est cependant pas possible d'obliger les partenaires à travailler dans ce système.

S'ils n'utilisent pas le REN09 et que plusieurs systèmes cohabitent sur le même chantier, ils sont en droit d'imposer le système légal, charge à SIG de faire les transformations nécessaires.

La contrainte principale à l'utilisation du REN09 est qu'il nécessite un traitement des données pour être confronté à d'autres données dans les systèmes légaux, et que si ce traitement est techniquement gérable, il nécessite néanmoins une certaine compétence et une communication spécifique.

---

<sup>20</sup> Déclaration de Travaux / Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux

De plus, dans 'l'arrêté du 15 février 2012 pris en application du chapitre IV du titre V du livre V du code de l'environnement relatif à l'exécution de travaux à proximité de certains ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques de transport ou de distribution', relatif à la réforme DT/DICT, l'article 15 spécifie clairement que tout relevé doit être géoréférencé conformément au décret du 26 décembre 2000. Étant donné l'enjeu que représente cette réforme pour Rennes Métropole, l'existence du REN09 sur l'agglomération est remise en question.

### **2.3.2 Les besoins en terme de classes de précisions**

Au sein du service SIG mutualisé Ville de Rennes/Rennes Métropole, un cahier des prescriptions générales de l'espace public faisant référence aux prestations topographiques a été mis en place [Morel, 2011], mais uniquement sur le territoire de la commune de Rennes. Ce dernier impose une classe de précision de 2 cm en planimétrie et de 1 cm en altimétrie sur les coordonnées de points de canevas de la Ville de Rennes. De plus, la détermination altimétrique des sommets du canevas doit être faite par nivellement direct. On peut se demander si les besoins en terme de précision pour Rennes Métropole seront les mêmes.

Pour ce faire, de nombreux textes régissent la mise en place des réseaux ou bien encore la réalisation d'aménagement pour l'accès aux handicapés (Arrêté du 15 janvier 2007 portant application du décret n° 2006-1658 du 21 décembre 2006 relatif aux prescriptions techniques pour l'accessibilité de la voirie et des espaces publics). Un inventaire des précisions utiles dans le cadre de prestations topographiques a été réalisé en interrogeant des personnes des autres services de la Ville de Rennes.

Au niveau des réseaux, bien qu'avec la réforme DT/DICT la précision de positionnement dans le système légal est peu importante (exemple : classe A correspondant à une classe de précision de 11 cm), les prestataires doivent positionner les réseaux d'assainissement ou de chauffage urbain avec une précision d'un ou deux centimètres en altimétrie pour permettre le respect des pentes d'écoulement du projet.

D'autres projets, notamment en matière de voirie, nécessitent cette même précision altimétrique. C'est le cas de la pose de bordures, des implantations, des accès handicapés pour faciliter notamment le déplacement des personnes à mobilité réduite. La mise en place d'un canevas permet de faciliter la mise en œuvre de ces travaux.

Il s'avère donc que pour réaliser des prestations de qualités et homogènes entre elles, une classe de précision de 1 cm en altimétrie est conseillée dans le cadre de l'aménagement du domaine public. Un autre point qui pousserait à utiliser ces précisions est que la Ville de Rennes travaille déjà dans ces conditions avec une classe de précision pour les objets levés le plus précisément de 1,5 cm. Si la classe de précision altimétrique sur Rennes Métropole hors Ville de Rennes était supérieure à 1 cm, cela engendrerait un changement dans les classes de précisions des objets.

La base créée sur Rennes Métropole ne serait alors pas en cohérence en terme de précision des objets levés avec celle de la Ville de Rennes.

La planimétrie est le plus souvent moins problématique que l'altimétrie, sauf cas exceptionnel, implantation en limite de propriété par exemple. La précision planimétrique actuelle sur la Ville de Rennes de 2 cm peut donc convenir à Rennes Métropole.

Garder les mêmes classes de précisions sur Ville de Rennes et Rennes Métropole hors Ville de Rennes permettrait de garder la cohérence des données et des bases.

### **2.3.3 Les besoins en terme de canevas**

Contrairement à la Ville de Rennes où un canevas planimétrique et altimétrique est déjà mis en place et est très développé, rien n'existe sur Rennes Métropole mis à part le réseau de points de l'IGN.

Pour quantifier le besoin en points de canevas, un inventaire du réseau de détail français a été réalisé sur Rennes Métropole. Il existe encore trente points géodésiques vérifiés sur le terrain dont 21 exploitables au GNSS ayant une précision planimétrique de  $\pm 10$  cm. La même chose a été réalisée pour les repères de nivellement. Un dénombrement via le géoportail a été réalisé et se trouve en annexe 2. Il en ressort que la densité des repères est correcte et pourrait permettre la réalisation de nivellement direct sur l'ensemble des zones urbanisées (centre bourg) si tous les points étaient présents sur le terrain. Cependant, cela nécessiterait de longs cheminements. Un inventaire sur le terrain de l'existant sera indispensable pour évaluer de futurs besoins.

## **2.4. Enquête auprès d'autres collectivités**

Pour voir si les contraintes ci-dessus sont internes à Rennes ou non, une enquête a été menée au sein de dix-neuf collectivités françaises choisies en fonction de leurs infrastructures et de leurs compétences en matière de topographie. Trois thèmes y étaient abordés : le canevas et sa mise en place, les contraintes liées aux transports en commun guidés (métro ou tramway) et le contrôle altimétrique. L'ensemble des résultats des douze collectivités ayant répondu à l'enquête se trouve en annexe 3.

### **2.4.1 Canevas et mise en place**

Après analyse de cette enquête, il s'avère que la technique GNSS est de plus en plus utilisée dans la mise en place de canevas, mais que les moyens traditionnels (tachéométrie et nivellement direct) restent très employés surtout pour la détermination de l'altimétrie. Dans le cadre de cette enquête, trois villes ont particulièrement retenu notre attention au niveau de la gestion de leur canevas.

La première, la collectivité de Marseille, ne possède aucun canevas. En effet, le passage au système légal RGF93 s'est avéré difficile. Une transformation à sept paramètres a été réalisée, mais les résidus étant trop importants dus à une inhomogénéité du système en place, il a tout simplement été décidé d'abandonner le canevas. Tous les points sont désormais déterminés en temps réel avec le réseau Teria. L'altimétrie est également déterminée le plus souvent de cette façon sauf demande spécifique, le nivellement direct ou indirect est alors préconisé. Ils ne récupèrent donc aucune station pour alimenter une base de données et s'en resservir par la suite.

La seconde collectivité est celle de Grenoble. Un canevas peu dense altimétrique et planimétrique a été réalisé sur l'ensemble de leur agglomération comprenant trois points par commune.

Ces points permettent de se rattacher au canevas géodésique intercommunal. Pour ce faire, les prestataires doivent réaliser une initialisation de leur récepteur GNSS sur ces points et fournir les écarts dans leur rapport. Il a été réalisé grâce à la collaboration de l'IGN et d'un cabinet de géomètre local par méthode GNSS post traitement (trois récepteurs fonctionnaient en même temps). Ils obtiennent ainsi un canevas de précision de 2 cm en planimétrie et 1 cm en altimétrie.

Enfin, Le Grand Lyon a également mis un canevas en place sur leur agglomération. Il se compose de plus de 8 000 points de quatre ordres ayant une précision planimétrique de 1 à 4 cm selon ce dernier. La précision altimétrique est quant à elle dans tous les cas de 1 cm. Le premier ordre est mis en place par le biais de marché public ou d'opération spécifique. Les autres sont soit réalisés par des prestataires, soit par le service compétent au sein du Grand Lyon. Les moyens traditionnels sont utilisés pour réaliser ces prestations topographiques. En effet, la planimétrie est mise en place le plus souvent par relèvement. En fonction de l'ordre des points, sont demandées des visées sur des références d'ordre supérieur. Plus l'ordre est précis, plus le nombre de visées est bien entendu important pour maximiser les contrôles et compenser les erreurs au maximum. Quant à elle, la détermination de l'altimétrie est réalisée par nivellement direct dès que possible. Le GNSS est utilisé en dernier recours si les méthodes traditionnelles ne fonctionnent pas.

Ces trois exemples sont des solutions qui peuvent être envisagées pour Rennes Métropole, mais peuvent-elles y être applicables ?

### **2.4.2 Contraintes liées aux transports en commun guidés**

Comme vu précédemment, le REN09 a été mis en place notamment pour la réalisation du métro. Nous avons donc voulu savoir comment les autres collectivités géraient ce problème d'altération linéaire dans le cadre de grands travaux.

Il s'est avéré que toutes les collectivités ayant répondu possèdent un transport en commun guidé, mais que seulement trois d'entre elles ont mis en place un système local. Cependant, toutes ont pratiquement la même altération linéaire que Rennes soit 8 cm/km. Ce système a été mis en place uniquement pour la zone couverte par l'emprise du chantier. Les autres collectivités ont pour la plupart laissé la gestion de ce projet aux entreprises compétentes ou tout simplement travaillé dans le système légal en vigueur en maîtrisant l'altération linéaire.

Au vu de cette enquête, on peut se demander si la Ville de Rennes ne pousse pas l'analyse de la contrainte de l'altération linéaire trop loin. Depuis 2012, l'extension du REN09 sur Rennes Métropole prévue initialement à la création du REN09 est donc sérieusement remise en question.

### **2.4.3 Contrôle de l'altimétrie**

Enfin, le dernier point abordé a été le contrôle de l'altimétrie. En effet, depuis l'arrêté de 2003 sur les classes de précision, le contrôle de la planimétrie et de l'altimétrie est recommandé. Avec l'émergence des techniques GNSS, le contrôle de la planimétrie est aujourd'hui facile à mettre en place, le plus problématique reste l'altimétrie. Le travail le plus important du service SIG sur l'agglomération de Rennes s'avérera être à l'avenir le contrôle des travaux réalisés par les prestataires.

C'est pourquoi il est intéressant de connaître le fonctionnement des autres collectivités à ce sujet. Cependant, ce contrôle n'est pas encore systématique. Il s'avère que cinq collectivités ne réalisent encore aucun contrôle sur le terrain. Néanmoins, la plupart mettent en place des nivellements directs qui restent le moyen le plus sûr de contrôler l'altimétrie. La technique GNSS est quant à elle utilisée pour trois collectivités, mais avec le plus souvent des contrôles supplémentaires sur le terrain (nivellement direct) ou au bureau (analyse des fichiers de mesure ou recalcul de ces derniers).

Ces résultats permettent ainsi de faire l'inventaire de toutes les possibilités qui s'offrent à nous.

Cette enquête nous a permis d'étudier le fonctionnement d'autres collectivités et ainsi de lancer les premières pistes pour résoudre nos problématiques.

Plusieurs solutions de mise en place de canevas ont été abordées, l'extension du système local REN09 est déjà remise en cause et enfin, des solutions de contrôle de l'altimétrie s'offrent à nous. La suite de ce PFE permettra d'étudier la faisabilité des pistes lancées grâce à cette enquête.

### **2.5. Conclusion**

Cette partie a permis de cerner les particularités du fonctionnement de Rennes Métropole et notamment de son service SIG. La réalisation du VDR79 puis du REN09 en est la principale singularité. Sa création a été motivée par une altération linéaire moyenne de huit centimètres par kilomètre sur l'agglomération et par la mise en place de deux lignes de métro. Cependant, le décret de 2000 portant sur la réalisation d'un système géodésique général sur la France remet en cause l'utilisation du REN09 sur l'ensemble de l'agglomération.

Un premier état des lieux des points géodésiques sur Rennes Métropole a pu être réalisé. Très peu de bornes IGN sont encore présentes et un inventaire sur le terrain des repères de nivellement est nécessaire pour quantifier les besoins de consolidation.

Enfin, au terme de l'analyse des besoins, les premières classes de précisions pour Rennes Métropole hors Ville de Rennes ont pu être énoncées. Elles seraient les mêmes que sur la Ville de Rennes à savoir 2 cm en planimétrie et 1 cm en altimétrie. Il ne reste donc plus qu'à vérifier dans quelles conditions ces classes de précisions pourront être appliquées.



## Partie 3

# CHOIX DU SYSTÈME GÉODÉSIQUE ET MATÉRIALISATION

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CHOIX DU SYSTÈME GÉODÉSIQUE ET MATÉRIALISATION .....                                                   | 39 |
| 3.1. Choix du système de coordonnées planimétrique .....                                               | 40 |
| 3.1.1 Étude des différentes solutions envisageables.....                                               | 40 |
| 3.1.1.1 Toute l'agglomération en REN09 .....                                                           | 40 |
| 3.1.1.2 Toute l'agglomération en CC48 sauf le métro en REN09.....                                      | 41 |
| 3.1.1.3 Ville de Rennes en REN09 et Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48 .....                | 41 |
| 3.1.1.4 Ville de Rennes et certaines ZAC en REN09, Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48 ..... | 42 |
| 3.1.1.5 Intra-rocade en REN09, Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48 .....                     | 43 |
| 3.1.1.6 Ville de Rennes et sa périphérie en REN09, le reste en CC48 .....                              | 43 |
| 3.1.2 Solution choisie .....                                                                           | 45 |
| 3.1.2.1 Justifications.....                                                                            | 45 |
| 3.1.2.2 Impacts sur la base de données et les utilisateurs .....                                       | 45 |
| 3.2. Choix de la mise en place d'un canevas .....                                                      | 46 |
| 3.2.1 Tests GNSS .....                                                                                 | 46 |
| 3.2.1.1 Tests GNSS sur la Ville de Rennes .....                                                        | 46 |
| 3.2.1.2 Tests GNSS sur Rennes Métropole .....                                                          | 48 |
| 3.2.1.3 Préconisations sur le calcul en post traitement .....                                          | 51 |
| 3.2.2 Étude des différentes solutions envisageables.....                                               | 52 |
| 3.2.2.1 Création d'un canevas peu dense en XYZ.....                                                    | 53 |
| 3.2.2.2 Création d'un canevas altimétrique .....                                                       | 53 |
| 3.2.2.3 Pas de création de canevas .....                                                               | 55 |
| 3.2.3 Solution choisie .....                                                                           | 56 |
| 3.2.3.1 Justifications .....                                                                           | 56 |
| 3.2.3.2 Mise à disposition des données .....                                                           | 56 |
| 3.3. Aspects administratifs .....                                                                      | 57 |
| 3.3.1 Encadrement des prestations .....                                                                | 57 |
| 3.3.1.1 Systèmes de références géographiques.....                                                      | 57 |
| 3.3.1.2 Classes de précision.....                                                                      | 57 |
| 3.3.2 Contrôle de l'altimétrie.....                                                                    | 57 |
| 3.3.3 Recommandation de méthodes pour les prestataires .....                                           | 58 |
| 3.4. Conclusion.....                                                                                   | 58 |

Cette partie permettra d'effectuer le choix du système géodésique et du canevas. Pour ce faire, nous étudierons tout d'abord plusieurs scénarios pour le système géodésique. Puis, pour déterminer le type de canevas à mettre en place sur Rennes Métropole hors Ville de Rennes, des tests GNSS seront menés. Ils permettront de mettre en place différentes solutions. Enfin, après avoir pris les décisions sur ces deux éléments, des recommandations seront rédigées pour mettre en application les choix réalisés.

## **3.1. Choix du système de coordonnées planimétrique**

### **3.1.1 Étude des différentes solutions envisageables**

Avec l'existence du système géodésique REN09, la question du choix du système sur l'ensemble de l'agglomération se pose. Plusieurs scénarios sont ainsi envisageables.

#### **3.1.1.1 Toute l'agglomération en REN09**

Le REN09 a été créé dans l'optique de pouvoir l'étendre à l'ensemble de l'agglomération et sa mise en place a nécessité plus de 900 jours de travail. Il est donc naturel d'évoquer cette solution, car ce choix permettrait d'avoir un système unifié sans altération linéaire sur toute l'agglomération. Cependant, ce système n'est pas le système légal de diffusion et pose donc certains problèmes.

Tout d'abord, le REN09 étant un système local et donc méconnu par les utilisateurs, une assistance technique est nécessaire. Cela consiste à fournir des explications sur le système, mais surtout à résoudre les problèmes liés à son utilisation. Les problèmes les plus courants sont ceux liés à la déclaration du système dans les logiciels et dans les appareils ainsi qu'à l'explication de la réalisation de la transformation RGF93 vers REN09.

De nombreux prestataires ne maîtrisant pas les transformations géodésiques les font réaliser par le service SIG. Ils se déchargent ainsi de tout éventuel problème lié à la transformation de fichiers, s'appuyant sur le fait que le REN09 n'est pas un système légal et qu'ils n'ont pas à les effectuer.

Le problème de transformation touche les fichiers issus des logiciels autres que TopStation. En effet, ce logiciel SIG gère très bien les changements de coordonnées. Quant aux fichiers de type dessin au format dwg ou dxf, ils posent plus de problèmes. Ils doivent être transformés avec le logiciel Autocad 2013 et l'extension Map, une notice d'utilisation a été mise en place par Antoine Guillot lors de la réalisation de son projet de fin d'études (Annexe 4). Aujourd'hui, environ 500 fichiers sont transformés annuellement sur la Ville de Rennes, représentant environ trois semaines complètes de travail pour une personne. Ces fichiers proviennent de différents services en interne, mais aussi et principalement de sources externes telles que des cabinets de géomètre, des bureaux d'étude, des cabinets d'architecte, la SNCF ou bien encore ERDF-GRDF. L'ensemble de l'agglomération en coordonnées REN09 ferait grimper le nombre de fichiers à transformer et le temps à y consacrer.

En moyenne, seulement 50 % des fichiers sont transformés du premier coup sans problèmes apparents. Pour les 50 % restants, plusieurs problèmes peuvent se poser :

- Certains fichiers ne sont pas transformés, ils restent dans le système de coordonnées d'origine.
- Une mauvaise transformation a pu être réalisée, le fichier se trouve dans le bon système de coordonnées, mais n'est pas localisé au bon endroit.
- Certains blocs peuvent poser problème. En effet, ces derniers ne sont pas localisés au bon endroit comme la figure 23 l'illustre. Il faut alors les exploser et l'information est dès lors déstructurée.

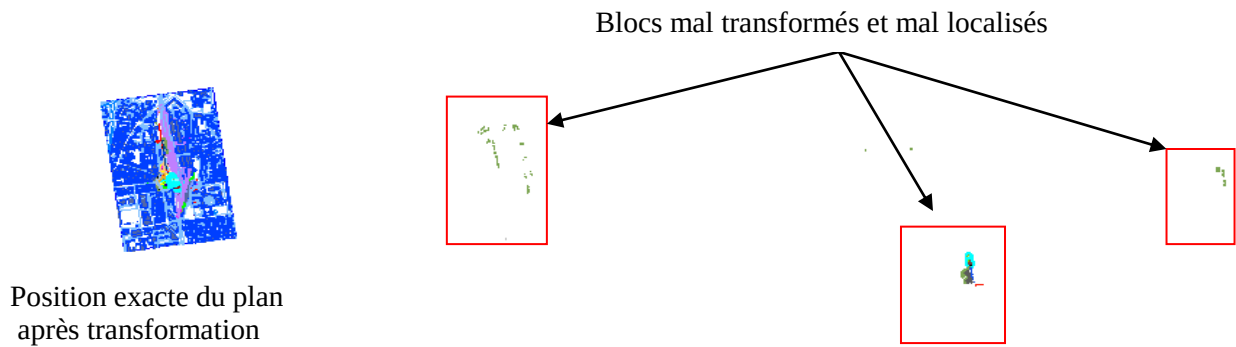


**Figure 23 : Problème lié à la transformation de coordonnées**

- Les fichiers liés entre eux par des Xref ne peuvent être transformés. Il faut les transformer indépendamment.
- Certains éléments peuvent tout simplement disparaître du dessin.
- Certaines hachures peuvent également poser des problèmes et ne plus se trouver au bon endroit.

Enfin, dans tous les cas, la mise en page dans l'espace papier est perdue. En effet, n'étant plus dans le même système de coordonnées, le dessin ne se trouve plus dans la zone sélectionnée précédemment.

L'inconvénient est que tous ces problèmes surviennent aléatoirement, il faut donc être très vigilant. Avant le passage à Autocad Map 2013, les problèmes étaient encore plus nombreux et la transformation était parfois tout simplement impossible.

Tous ces problèmes ajoutés au fait que les petites communes ne sont pas compétentes en terme de changement de référentiel font que cette solution est très peu envisageable.

#### **3.1.1.2 Toute l'agglomération en CC48 sauf le métro en REN09**

Cette solution est l'opposée de la précédente. En effet, l'ensemble de l'agglomération serait en système légal CC48 et donc également unifié. Toutes les données existantes des différents prestataires seraient désormais confrontables. L'avantage de cette solution est que le REN09 n'est pas utilisé pour les travaux de topographie courants. Ainsi, tous les inconvénients liés aux systèmes disparaissent dont l'assistance technique et les transformations de fichiers.

Néanmoins, le chantier du métro resterait dans ce système local pour en garder les avantages. Tous les fichiers liés à la réalisation du métro en sous-sol seraient en REN09. Ces fichiers sont gérés par une seule et même entreprise, la SEMTCAR. Quant à elles, les données de surface resteraient en CC48. Seuls les fichiers faisant la jonction entre la surface et le sous-sol auraient besoin d'être transformés. Cela représenterait environ 400 fichiers sur l'ensemble du métro, et ce, jusqu'à la fin de ce projet en 2018. On est donc loin des 500 fichiers transformés annuellement sur la Ville de Rennes.

#### **3.1.1.3 Ville de Rennes en REN09 et Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48**

Une des solutions envisagées pour ne pas trop bouleverser les méthodes de travail actuelles sur la Ville de Rennes est de la laisser en REN09 et de mettre le reste de l'agglomération en CC48 comme illustré figure 24.

Cela permet d'être dans le système légal sur l'agglomération hors Ville de Rennes et donc ne pas avoir à faire de changement de référentiel sur cette partie contrairement à la solution du paragraphe 3.1.1.1. Cependant, des problèmes de continuité de bâtiment apparaissent aux frontières de la Ville de Rennes.

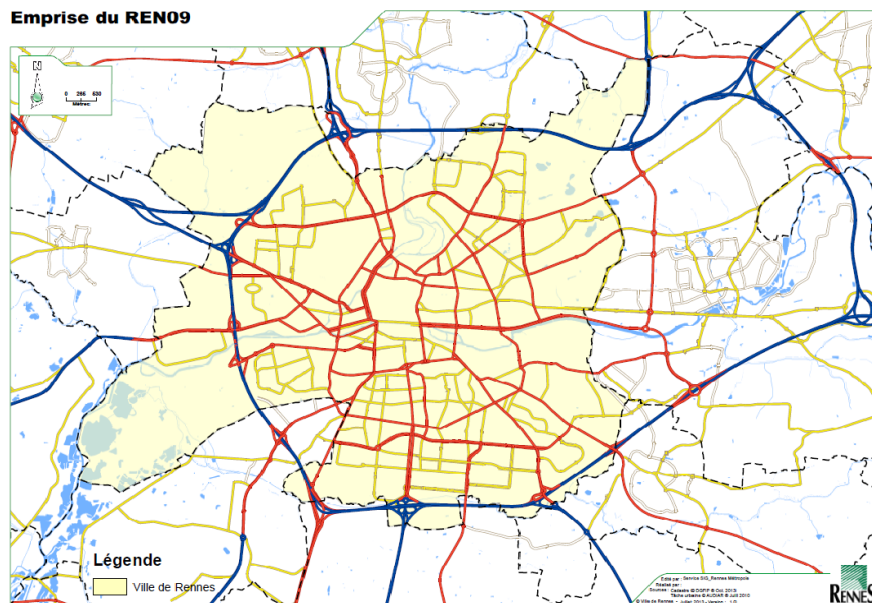


Figure 24 : REN09 sur la Ville de Rennes.

#### 3.1.1.4 Ville de Rennes et certaines ZAC en REN09, Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48

La solution précédente pose donc le problème de continuité de bâtiment. En effet, trois zones d'aménagement concerté (ZAC) sont actuellement à cheval sur la ville et les communes limitrophes. Une nouvelle variante de la solution précédente a donc vu le jour. Le REN09 serait appliqué à la Ville de Rennes et aux trois ZAC. La figure 25 représente cette solution.

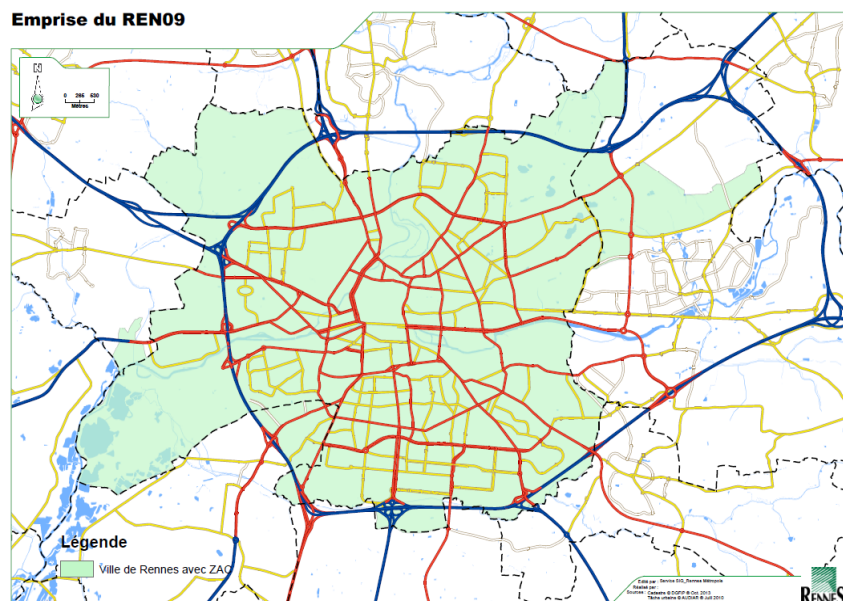


Figure 25 : REN09 sur la Ville de Rennes et les ZAC limitrophes.

### 3.1.1.5 Intra-rocade en REN09, Rennes Métropole hors ville de Rennes en CC48

Enfin, après une analyse géographique, une solution suivant des limites géographiques existantes s'est dessinée. En effet, la rocade est une limite physique ne pouvant avoir de continuité de bâtiment de part et d'autre de cette dernière. De plus, le territoire de la rocade étant géré par le Conseil Général et non Rennes Métropole, la donnée est donc moins importante sur cette zone. Le REN09 serait donc appliqué intra-rocade comme illustré figure 26. Cependant, quelques projets en dehors de la rocade devront rester en REN09. Ceci est le cas pour les deux garages ateliers des métros se trouvant de l'autre côté des rocades et d'une ZAC se situant de part et d'autre de la rocade.

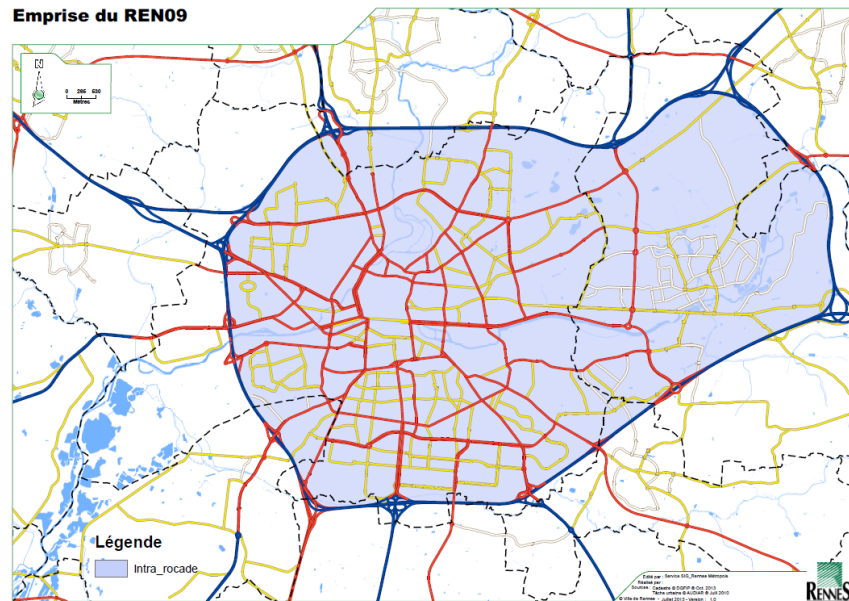


Figure 26 : REN09 intra rocade.

Après étude des trois variantes concernant une restriction du REN09 (cf § 3.1.1.3, 3.1.1.4 et 3.1.1.5), il en ressort que l'utilisation du REN09 intra-rocade avec le reste de l'agglomération en CC48 est préférable.

### 3.1.1.6 Ville de Rennes et sa périphérie en REN09, le reste en CC48

Enfin, pour se poser moins de questions sur la continuité des bâtiments, une solution envisageable est de mettre la Ville de Rennes et sa périphérie en REN09. La détermination de ces villes périphériques peut être envisagée grâce à la définition des aires urbaines selon l'AUDIAR<sup>21</sup> figure 28 et l'INSEE<sup>22</sup> figure 27. L'ensemble de ces communes est donc dans une même continuité urbaine, le problème de discontinuité n'aurait plus lieu d'être avec ces choix.

<sup>21</sup> Agence d'urbanisme et de développement intercommunal de l'agglomération rennaise

<sup>22</sup> Institut national de la statistique et des études économiques

### Partie 3 - Choix du système géodésique et matérialisation

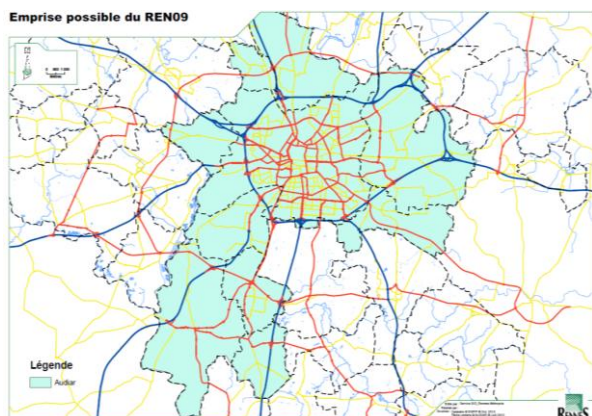


Figure 28 : Définition des aires urbaines selon l'AUDIAR.

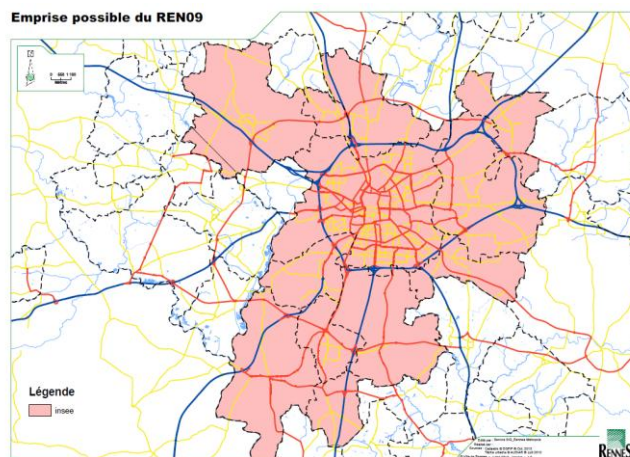


Figure 27 : Définition des aires urbaines selon l'INSEE.

Cependant, plus nombreuses seront les communes en REN09, plus nombreuses seront les difficultés. En effet, davantage de prestataires travailleront dans ce système et donc les problèmes d'assistance technique et de gestion des fichiers seront de plus en plus importants.

Un tableau récapitulatif pour l'aide à la décision a été créé, figure 29.

|                                             | Toute l'agglomération en REN09 | Toute l'agglomération en CC48 sauf le métro | Rennes Métropole intra rocade en REN09 et le reste en CC48 | Ville de Rennes et sa périphérie en REN09 le reste en CC48 |
|---------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Altération linéaire nulle                   | +                              | +                                           | +                                                          | +                                                          |
| Système légal                               | -                              | +                                           | +                                                          | +                                                          |
| Échange de fichier                          | -                              | +                                           | +                                                          | +                                                          |
| Transformation des fichiers                 | -                              | +                                           | -                                                          | -                                                          |
| Assistance technique du REN09               | -                              | +                                           | +                                                          | -                                                          |
| Données générales confrontables             | -                              | +                                           | -                                                          | -                                                          |
| Continuité des levés                        | +                              | +                                           | +                                                          | +                                                          |
| Référentiel unifié                          | +                              | +                                           | -                                                          | -                                                          |
| Gestion des projets connexes au métro       | +                              | -                                           | +                                                          | +                                                          |
| Gestion des projets existants déjà en REN09 | +                              | -                                           | +                                                          | +                                                          |

+ : points positifs      - : points négatifs

Figure 29 : Avantages inconvénients de chaque solution.

À la fin de cette étude, la solution la plus judicieuse à mon avis serait la deuxième, c'est-à-dire de travailler partout en CC48 excepté pour le métro. Ce choix permettrait de simplifier les échanges entre tous les intervenants et de travailler dans le système légal. En effet, seul le métro serait en REN09 et les intervenants actuels sur ce chantier maîtrisent déjà les subtilités de ce système géodésique qui se justifie pour un projet de cette envergure.

### 3.1.2 Solution choisie

#### 3.1.2.1 Justifications

Au regard des difficultés actuelles liées au système géodésique REN09, les solutions 1 et 6 se sont vues très rapidement mises de côté. En effet, le temps passé sur les problèmes liés au REN09 serait décuplé si l'ensemble ou une partie de l'agglomération se trouvait dans ce système.

Deux propositions ont donc été plus particulièrement étudiées : la première, qui permettrait d'avoir l'ensemble de l'agglomération en CC48 et le métro en REN09 et la seconde, qui serait une restriction du REN09 intra-rocade.

La première a l'avantage d'être dans le système légal sur l'ensemble du territoire. De plus, les contraintes liées au REN09 n'auraient plus lieu d'être, excepté sur le métro. Enfin, l'existence du REN09 pour des travaux topographiques courants que ce soit sur la Ville de Rennes ou sur l'agglomération hors Ville de Rennes, n'est pas justifiée. Il n'est donc pas aberrant d'utiliser ce système géodésique uniquement sur le métro. Cette solution semble néanmoins trop ambitieuse. En effet, pendant un certain temps, de nombreux projets cohabiteraient et seraient donc difficiles à gérer. Un autre aspect, l'aspect politique entre également en jeu. Le REN09 étant en place depuis seulement 2009, sa suppression totale ne serait pas comprise par les services quatre ans après sa mise en place. En effet, il avait nécessité de nombreux échanges, mais également des coûts importants. Cette solution est donc pour le moment mise de côté. Mais si la gestion du REN09 intra-rocade s'avère difficile, un passage au système géodésique CC48 est toujours envisageable sur l'ensemble de l'agglomération.

C'est donc la solution utilisant le REN09 intra-rocade et le reste de l'agglomération en CC48 qui a été choisie. En effet, elle permet de garder le même fonctionnement qu'aujourd'hui et donc les avantages du système géodésique spécifique à Rennes. La charge de travail quant à l'assistance technique du REN09 devrait rester stable vu que l'intra-rocade englobe la plupart des projets où Rennes Métropole est maître d'ouvrage. De plus, la matérialisation physique de la séparation des deux systèmes par la rocade permettra de limiter les opérations de part et d'autre de cette dernière et de faciliter la communication sur l'application du système.

#### 3.1.2.2 Impacts sur la base de données et les utilisateurs

Un début de réflexion sur la gestion des bases de données a commencé à être mené avec les personnes du pôle études et développements qui gèrent les bases de données. La base actuellement existante sur la Ville de Rennes sera gardée et stockée de son côté. En effet, les données n'ont pas le même fonctionnement que pour le reste de l'agglomération, notamment concernant les droits de diffusion et la propriété des données. Le stockage des données du reste de l'agglomération n'est pas envisagé en une seule base, car cela s'avérerait trop lourd. Un découpage en plusieurs bases est envisagé et sera plus facile à gérer. Il y aura donc la base Ville de Rennes intra-rocade en REN09, une base intra-rocade complémentaire en REN09 ainsi que très probablement deux bases CC48 (une au nord et une au sud délimitées par des limites administratives ou naturelles). Il reste la question des données extra-rocade de la Ville de Rennes. Doit-on créer une base Ville de Rennes en CC48 ou alors les inclure dans les bases CC48 du reste de l'agglomération ? Dans tous les cas, le fonctionnement sera transparent pour les utilisateurs qui se connectent aux bases. En effet, même si ces derniers demandent à visualiser des données stockées sur deux bases (l'une en CC48 et l'autre en REN09), l'extraction depuis les bases se fera dans le système de coordonnées choisi par l'utilisateur avec la transformation à la volée d'une partie des données.

## **3.2. Choix de la mise en place d'un canevas**

### **3.2.1 Tests GNSS**

Des tests GNSS ont été effectués sur la Ville de Rennes et Rennes Métropole afin de vérifier si la mise en place d'un canevas de précisions de 1 cm en altimétrie et de 2 cm en planimétrie est possible avec cette technologie. Si ces précisions ne peuvent être atteintes, ces tests permettront alors de déterminer les nouvelles classes de précisions possibles en GNSS sur Rennes Métropole et les techniques à mettre en œuvre.

Pour ce faire, chaque point a été observé pendant deux sessions de deux heures puis calculé en post traitement. Dès le départ, il n'a pas été envisageable de réaliser des observations plus longues du fait des contraintes internes du service (disponibilité et coût du personnel). Le but de ces tests est de trouver une méthode efficace en fonction des possibilités du service et de ses moyens et non pas la meilleure méthode, trop contraignante à mettre en place par la suite.

De plus, à chaque session, le point a été observé en temps réel. Deux déterminations de temps réel ont été possibles. En effet, le service SIG possède une antenne permanente positionnée sur son toit. Cette antenne est également, depuis peu, mise à disposition du réseau Teria. Comme aujourd'hui l'ensemble du service ne travaille pas avec Teria, mais avec seulement la station de Rennes, il a été intéressant de comparer ces deux méthodes.

L'arrêté sur les classes de précision sera appliqué à nos mesures pour savoir si ces dernières entrent dans les tolérances de cet arrêté. L'ensemble de points sera alors considéré comme un échantillon de mesure. Pour une classe de précision de 2 cm en planimétrie, l'écart moyen est alors de 2,3 cm avec un premier seuil à 5,4 cm et un second à 8,2 cm. Enfin, pour une classe de précision altimétrique de 1 cm, l'écart moyen est de 1,1 cm pour un premier seuil à 3,6 cm et un second à 5,5 cm.

Pour l'ensemble des résultats,  $\Delta$  représentera la valeur vraie moins la valeur obtenue en GNSS.

#### **3.2.1.1 Tests GNSS sur la Ville de Rennes**

La première partie des tests sur la Ville de Rennes avait pour but de déterminer la précision planimétrique et altimétrique du GNSS sur la Ville, mais également de faire le choix du matériel pour la suite des tests sur Rennes Métropole.

Quatre points ont ainsi été étudiés dans cette première phase. Ils ont été choisis du fait de leur position et de leur mode de détermination. En effet, tous ces points étaient localisés dans un environnement très dégagé situés sur des ponts de la rocade ou sur le toit du bâtiment du service SIG à proximité de l'antenne GNSS. De plus, ils ont été déterminés par triangulation et nivellement direct ce qui permettra de les considérer comme des données de référence. Trois points se situent au sud et un au centre de Rennes, ils ont été mis en place lors de la création de la triangulation pour le VDR79. Beaucoup ont disparu depuis et c'est pourquoi il n'a pas été possible d'étudier plus de points mieux répartis sur la Ville de Rennes.

L'ensemble des mesures a été réalisé avec un récepteur GNSS Leica Viva GS15 et un Trimble R8.

Le récepteur Viva GS 15 a pour précision en mode statique  $\pm 3 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$  en horizontal et  $\pm 6 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$  en vertical. Quant à lui, le Trimble R8 a pour précision  $\pm 3 \text{ mm} + 0,1 \text{ ppm}$  en horizontal et  $\pm 3,5 \text{ mm} + 0,4 \text{ ppm}$  en vertical, tout cela pour le mode statique également.

Les sessions de mesure ont par la suite été calculées avec des logiciels de post traitement constructeur et de nombreux paramètres ont été expérimentés afin de commencer à dégager les conditions optimales de calcul (influence des éphémérides, méthode de calcul, logiciels de calcul, calcul GNSS et GPS, etc.). L'influence de ces paramètres sera affinée avec les résultats des tests sur Rennes Métropole.

Les figures 30 et 31 présentent les écarts obtenus en post traitement et en temps réel avec les deux récepteurs GNSS. Chaque donnée a été calculée avec son logiciel constructeur correspondant : Leica Viva GS15 avec Leica Geo Office et Trimble R8 avec Trimble Business Center.

|         | Post traitement Trimble R8/TBC |                        |                        |                         |                         | Temps réel Trimble R8  |                        |                        |                         |                         |
|---------|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|         | $\Delta X \text{ (m)}$         | $\Delta Y \text{ (m)}$ | $\Delta Z \text{ (m)}$ | Écart en position 2D(m) | Écart en position 3D(m) | $\Delta X \text{ (m)}$ | $\Delta Y \text{ (m)}$ | $\Delta Z \text{ (m)}$ | Écart en position 2D(m) | Écart en position 3D(m) |
| 101     | 0,018                          | 0,000                  | 0,004                  | 0,018                   | 0,018                   | 0,017                  | -0,007                 | 0,007                  | 0,018                   | 0,020                   |
| 265     | -0,007                         | 0,002                  | 0,009                  | 0,007                   | 0,012                   | -0,002                 | -0,006                 | 0,001                  | 0,006                   | 0,007                   |
| 295     | -0,010                         | -0,013                 | 0,005                  | 0,016                   | 0,017                   | -0,006                 | 0,001                  | 0,009                  | 0,006                   | 0,011                   |
| 385     | -0,019                         | -0,003                 | 0,002                  | 0,019                   | 0,019                   | -0,013                 | -0,019                 | 0,016                  | 0,024                   | 0,029                   |
| Moyenne | -0,004                         | -0,003                 | 0,005                  | 0,015                   | 0,017                   | -0,001                 | -0,008                 | 0,008                  | 0,014                   | 0,016                   |

**Figure 30 : Écarts entre les coordonnées connues et le post traitement et entre les coordonnées connues et le temps réel avec le récepteur GNSS Trimble R8 sur Ville de Rennes.**

|         | Post traitement Viva GS15/LGO |                        |                        |                         |                         | Temps réel Viva GS15   |                        |                        |                         |                         |
|---------|-------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
|         | $\Delta X \text{ (m)}$        | $\Delta Y \text{ (m)}$ | $\Delta Z \text{ (m)}$ | Écart en position 2D(m) | Écart en position 3D(m) | $\Delta X \text{ (m)}$ | $\Delta Y \text{ (m)}$ | $\Delta Z \text{ (m)}$ | Écart en position 2D(m) | Écart en position 3D(m) |
| 101     | 0,018                         | 0,000                  | 0,003                  | 0,018                   | 0,018                   | 0,018                  | -0,006                 | 0,005                  | 0,019                   | 0,020                   |
| 265     | -0,008                        | 0,001                  | 0,011                  | 0,008                   | 0,014                   | -0,010                 | 0,005                  | 0,006                  | 0,011                   | 0,013                   |
| 295     | -0,011                        | -0,011                 | 0,014                  | 0,016                   | 0,021                   | -0,015                 | -0,024                 | 0,015                  | 0,029                   | 0,032                   |
| 385     | -0,019                        | -0,002                 | 0,001                  | 0,019                   | 0,019                   | -0,005                 | -0,005                 | -0,011                 | 0,007                   | 0,013                   |
| Moyenne | -0,005                        | -0,003                 | 0,007                  | 0,015                   | 0,018                   | -0,003                 | -0,008                 | 0,004                  | 0,017                   | 0,020                   |

**Figure 31 : Écarts entre les coordonnées connues / post traitement et entre les coordonnées connues / temps réel avec le récepteur GNSS Leica Viva GS15 sur la Ville de Rennes.**

Dans ces premiers résultats sur la Ville de Rennes, on peut s'apercevoir que les classes de précision de 1 cm en altimétrie et de 2 cm en planimétrie sont respectées avec les deux récepteurs et avec les deux méthodes de détermination. En effet, l'écart en position 2D et le  $\Delta Z$  sont inférieurs aux écarts moyens déterminés par l'arrêté de 2003. De plus, aucun point ne dépasse le premier seuil de 5,4 cm en planimétrie et celui de 3,6 cm en altimétrie. (figures 54, 55, 56 et 57 en annexe 7)

Les résultats en post traitement sont légèrement meilleurs, mais pas flagrants. En effet, étant très proche de la station de référence de Rennes, le temps réel donne de bons résultats dans des conditions d'observation optimales.

Les premiers résultats montrent que les classes de précision de la Ville de Rennes peuvent être appliquées avec les méthodes GNSS sur ce même territoire (post traitement et temps réel) dans des

conditions optimales d'observations. Au vu de ces résultats, les deux récepteurs GNSS sont équivalents.

Le Trimble R8 a été utilisé pour les tests sur Rennes Métropole, car étant acquis récemment, il était encore peu utilisé et donc disponible. De plus, le logiciel de traitement était accessible sur mon poste informatique. Enfin, c'est celui qui a une meilleure précision théorique annoncée.

### 3.2.1.2 Tests GNSS sur Rennes Métropole

Les tests sur Rennes Métropole se sont donc déroulés avec le récepteur GNSS Trimble R8. Ils ont pour but d'affiner les premiers résultats obtenus sur la Ville de Rennes et de les généraliser à Rennes Métropole.

Pour ce faire, 18 points ont été étudiés dans les mêmes conditions que pour la Ville de Rennes. Deux bornes connues en planimétrie et en altimétrie constituant un point du Réseau de Base Français avec une précision planimétrique inférieure à 5 et 1 cm et une précision altimétrique inférieure à 5 mm ont été observées. De plus, 16 points déterminés en altimétrie sur l'ensemble de l'agglomération ont également été déterminés. Ces derniers ont été implantés dans les communes ayant des triplets pour faciliter la détermination de l'altitude par nivellement direct. Les communes en gris sur la figure 32 représentent les agglomérations testées sur Rennes Métropole. Le point mis en place le plus loin est Le Verger situé à environ 20 km de Rennes et le plus près est le point localisé à St-Grégoire situé à environ 4 km.

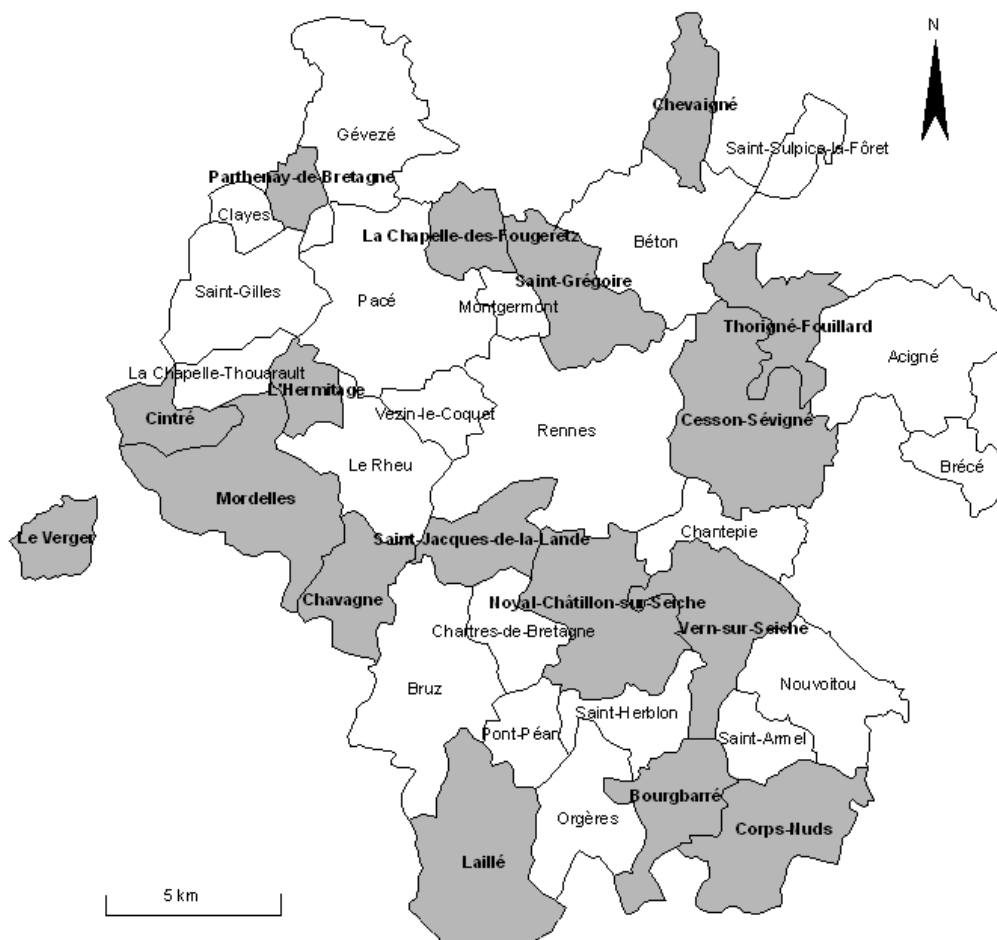


Figure 32 : Villes tests sur Rennes Métropole.

### 3.2.1.2.1 La planimétrie

La majorité des points n'ayant pas de coordonnées planimétriques connues, des calculs de post traitement sous différents logiciels ont été réalisés afin de pouvoir obtenir une valeur la plus cohérente possible et ainsi la comparer au temps réel. Les logiciels constructeurs de Leica et Trimble ont bien entendu été utilisés. Pour avoir un résultat plus indépendant, l'ensemble des observations a été fourni à l'IGN afin que ces derniers puissent les calculer avec le logiciel Bernese. La comparaison de tous ces

| Points  | Différence de coordonnées entre TBC et Bernese |               | Différence de coordonnées entre LGO et Bernese |               | Différence de coordonnées entre TBC et LGO |               |
|---------|------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------|---------------|
|         | $\Delta X(m)$                                  | $\Delta Y(m)$ | $\Delta X(m)$                                  | $\Delta Y(m)$ | $\Delta X(m)$                              | $\Delta Y(m)$ |
| BOU1    | 0,003                                          | 0,000         | 0,008                                          | 0,003         | 0,005                                      | 0,003         |
| CES1    | 0,000                                          | 0,001         | 0,006                                          | 0,005         | 0,006                                      | 0,004         |
| CHA1    | 0,000                                          | 0,001         | 0,002                                          | 0,009         | 0,002                                      | 0,008         |
| CHE1    | 0,001                                          | 0,002         | -0,001                                         | 0,009         | -0,002                                     | 0,007         |
| CIN1    | 0,003                                          | 0,004         | 0,002                                          | 0,006         | -0,001                                     | 0,002         |
| COR1    | 0,000                                          | -0,002        | 0,000                                          | 0,001         | 0,000                                      | 0,003         |
| LAI1    | 0,001                                          | 0,004         | 0,007                                          | 0,007         | 0,006                                      | 0,003         |
| LCF1    | -0,005                                         | -0,002        | -0,005                                         | 0,005         | 0,000                                      | 0,007         |
| LVE1    | -0,003                                         | 0,001         | -0,005                                         | 0,004         | -0,002                                     | 0,003         |
| LHE1    | -0,001                                         | 0,001         | -0,002                                         | 0,012         | -0,001                                     | 0,011         |
| MOR1    | 0,004                                          | 0,003         | 0,000                                          | 0,002         | -0,004                                     | -0,001        |
| NOY1    | -0,004                                         | 0,006         | -0,004                                         | 0,004         | 0,000                                      | -0,002        |
| PAR1    | -0,004                                         | -0,002        | -0,004                                         | -0,002        | 0,000                                      | 0,000         |
| SGR1    | 0,000                                          | 0,001         | 0,003                                          | 0,012         | 0,003                                      | 0,011         |
| SJL1    | 0,000                                          | 0,004         | 0,001                                          | 0,008         | 0,001                                      | 0,003         |
| TFO1    | -0,002                                         | 0,000         | 0,000                                          | 0,003         | 0,002                                      | 0,003         |
| VSE1    | -0,003                                         | 0,005         | 0,002                                          | 0,009         | 0,005                                      | 0,004         |
| Moyenne | -0,001                                         | 0,002         | 0,001                                          | 0,006         | 0,001                                      | 0,004         |

logiciels est présentée sur la figure 33.

La moyenne des écarts entre logiciels n'excède pas 6 mm, avec un écart maximum de 12 mm sur le Y entre LGO et Bernese. On peut ainsi considérer nos déterminations de coordonnées planimétriques en post traitement comme exactes.

Par la suite, les coordonnées obtenues avec TBC seront utilisées comme valeur vraie et comparées au temps réel.

Figure 33 : Comparaison planimétrique des différents logiciels.

Après comparaison des valeurs obtenues en post traitement et en temps réel, il s'avère que les résultats du temps réel entrent dans une classe de précision 2 cm. En effet, l'écart moyen en position est de 14 mm et aucun point ne sort du premier seuil. Avec ces premiers résultats, la classe de précision de 2 cm peut être applicable à Rennes Métropole hors Ville de Rennes. (figures 58, 59 et 60 en annexe 7)

Pour confirmer ces résultats, un point sur l'échantillon de Rennes Métropole a pu être comparé à sa valeur vraie donnée par l'IGN. Il est connu en planimétrie avec une précision inférieure à 1 cm.

|      | Post traitement |               |                         | Temps réel    |               |                         |
|------|-----------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|      | $\Delta X(m)$   | $\Delta Y(m)$ | Écart en position 2D(m) | $\Delta X(m)$ | $\Delta Y(m)$ | Écart en position 2D(m) |
| BOU2 | -0.003          | -0.007        | 0.008                   | -0.009        | -0.014        | 0.017                   |

Figure 34 : Écarts entre les coordonnées connues et le post traitement et entre les coordonnées connues et le temps réel avec le récepteur GNSS Trimble R8 sur le point du RBF.

Les résultats présentés figure 34 montrent que pour le point BOU2, les affirmations précédentes sont respectées. Le temps réel et bien entendu le post traitement sont des solutions envisageables pour la mise en place d'un canevas planimétrique de classe de précision 2 cm.

### 3.2.1.2.2 L'altimétrie

L'altitude de l'ensemble des points a été déterminée par nivellement direct avec un DNA03 de chez Leica et une mire invar. Un contrôle de stabilité a bien entendu été réalisé à partir des triplets, la fermeture des cheminements n'excédait pas deux millimètres avec une moyenne des fermetures à moins d'un millimètre. Ces altitudes obtenues par nivellement direct seront considérées comme valeurs vraies dans la suite des calculs. Les calculs ont également été réalisés avec les trois logiciels de traitement.

Tout d'abord, la comparaison avec le temps réel a été faite. La moyenne des écarts avec le nivellement direct est plutôt correcte, 26 mm (figure 61 en annexe 7). Cependant, si l'on analyse chaque valeur d'altitude temps réel individuellement, on s'aperçoit que 30 % des écarts sont supérieurs à 31 mm et certains peuvent aller jusqu'à plus de 90 mm (figure 62 en annexe 7). La classe de précision de 1 cm en altimétrie n'est donc pas respectée avec le temps réel. Cependant, le temps réel respecte une classe de précision de 2,5 cm pour l'altimétrie si l'on respecte un ensemble de précautions, notamment la détermination avec deux constellations différentes.

Après optimisation des calculs en post traitement (cf §3.2.1.3), on obtient comme moyenne des écarts entre l'altitude du nivellement direct et celui du post traitement, 24 mm pour le traitement sous Bernese, 23 mm sous TBC et 9 mm sous LGO (figure 64 annexe 7). De plus, pour le calcul sous Bernese et TBC, le premier seuil est trop souvent dépassé pour garantir la classe de précision 1 cm et le second est même dépassé avec Bernese (figures 65, 66 et 67 annexe 7). La classe de précision 1 cm en altimétrie ne serait respectée que pour le calcul sous LGO dans des conditions optimales.

| Points | Différence<br>Trimble R8<br>TBC/Bernese | Différence<br>Trimble R8<br>LGO/Bernese | Différence<br>Trimble R8<br>LGO/TBC |
|--------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
|        | $\Delta Z(m)$                           | $\Delta Z(m)$                           | $\Delta Z(m)$                       |
| BOU1   | -0,004                                  | 0,004                                   | 0,008                               |
| CES1   | 0,009                                   | 0,010                                   | 0,001                               |
| CHA1   | 0,014                                   | 0,028                                   | 0,014                               |
| CHE1   | -0,007                                  | 0,011                                   | 0,018                               |
| CIN1   | -0,012                                  | 0,007                                   | 0,019                               |
| COR1   | -0,002                                  | 0,013                                   | 0,015                               |
| LAI1   | 0,000                                   | 0,027                                   | 0,027                               |
| LCF1   | 0,015                                   | 0,024                                   | 0,009                               |
| LVE1   | 0,001                                   | 0,004                                   | 0,003                               |
| LHE1   | -0,003                                  | 0,004                                   | 0,007                               |
| MOR1   | -0,002                                  | 0,035                                   | 0,037                               |
| NOY1   | 0,002                                   | 0,027                                   | 0,026                               |
| PAR1   | 0,015                                   | 0,028                                   | 0,013                               |
| SGR1   | 0,003                                   | -0,003                                  | -0,006                              |
| SJL1   | 0,008                                   | 0,012                                   | 0,004                               |
| TFO1   | -0,005                                  | 0,004                                   | 0,009                               |
| VSE1   | -0,010                                  | 0,018                                   | 0,028                               |

Moyenne      0,001      0,015      0,014

Enfin, comme on peut le voir figure 35, des écarts entre logiciels peuvent aller jusqu'à 37 mm. La détermination de l'altitude en post traitement est très variable. Cette méthode n'est donc pas à mettre en œuvre par des prestataires dans le cas de cette classe de précision, car trop aléatoire. Cependant, le service SIG peut atteindre la classe de précision requise en altimétrie si les observations et les calculs sont réalisés dans les mêmes conditions que les tests (récepteur Trimble R8 et calcul avec LGO).

Si l'on compare les deux modes de détermination, la moyenne des écarts est pratiquement la même entre le temps réel et le calcul post traitement sous TBC. Néanmoins, le fait que les écarts en post traitement soient plus cohérents et plus stables (moins de variation des écarts) permet de dire que cette méthode reste la plus sûre à mettre en place pour une précision optimale.

Figure 35 : Différences d'altitude entre logiciels

### 3.2.1.2.3 Le temps réel

Comme expliqué précédemment, nous avons pu comparer deux modes de temps réel : la station de Rennes seule et le réseau Teria. La figure 36 représente les écarts du temps réel par rapport aux valeurs vraies en fonction de l'éloignement à la station de Rennes.

| Points  | Temps réel RENN |                |        |                         | Temps réel Teria |                |        |                         | Longueur ligne de base RENN_Pt | Meilleure solution |
|---------|-----------------|----------------|--------|-------------------------|------------------|----------------|--------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|
|         | $\Delta X$ (m)  | $\Delta Y$ (m) | Z (m)  | Écart en position 3D(m) | $\Delta X$ (m)   | $\Delta Y$ (m) | Z (m)  | Écart en position 3D(m) |                                |                    |
| S101    | 0,014           | -0,004         | 0,005  | 0,015                   | 0,013            | -0,005         | 0,008  | 0,016                   | 1,7 m                          | RENN               |
| S265    | -0,009          | 0,004          | 0,004  | 0,011                   | -0,010           | 0,007          | 0,008  | 0,015                   | 3074 m                         | RENN               |
| S295    | -0,016          | -0,023         | 0,016  | 0,032                   | -0,014           | -0,025         | 0,014  | 0,032                   | 3714 m                         | =                  |
| S385    | -0,012          | -0,011         | -0,011 | 0,020                   | 0,002            | 0,000          | -0,011 | 0,011                   | 3812 m                         | Teria              |
| SGR1    | -0,004          | -0,014         | 0,010  | 0,018                   | -0,004           | -0,022         | 0,003  | 0,023                   | 4784 m                         | RENN               |
| CES1    | -0,003          | -0,001         | 0,026  | 0,026                   | -0,003           | -0,002         | 0,023  | 0,023                   | 4896 m                         | Teria              |
| SJL1    | 0,012           | -0,003         | 0,005  | 0,014                   | 0,012            | -0,004         | 0,005  | 0,014                   | 6418 m                         | =                  |
| NOY1    | -0,008          | -0,006         | 0,030  | 0,032                   | -0,008           | -0,003         | 0,021  | 0,023                   | 7853 m                         | Teria              |
| VSE1    | -0,008          | -0,020         | 0,035  | 0,041                   | 0,005            | -0,029         | 0,011  | 0,032                   | 8077 m                         | Teria              |
| TFO1    | 0,001           | -0,004         | 0,039  | 0,039                   | -0,002           | 0,005          | 0,023  | 0,023                   | 8136 m                         | Teria              |
| LCF1    | -0,021          | -0,013         | 0,033  | 0,041                   | -0,014           | -0,018         | 0,017  | 0,028                   | 9017 m                         | Teria              |
| CHA1    | -0,016          | -0,007         | 0,061  | 0,064                   | -0,007           | -0,001         | 0,032  | 0,032                   | 11 229 m                       | Teria              |
| LHE1    | -0,005          | -0,015         | 0,028  | 0,032                   | 0,000            | -0,018         | 0,017  | 0,025                   | 11 317 m                       | Teria              |
| CHE1    | 0,004           | -0,007         | 0,022  | 0,024                   | -0,004           | 0,004          | 0,011  | 0,012                   | 11 803 m                       | Teria              |
| BOU1    | -0,016          | -0,032         | 0,020  | 0,041                   | -0,013           | -0,028         | 0,026  | 0,040                   | 12 987 m                       | Teria              |
| MOR1    | -0,006          | -0,016         | 0,036  | 0,040                   | -0,005           | -0,016         | 0,031  | 0,035                   | 13 675 m                       | Teria              |
| LAI1    | -0,005          | -0,010         | 0,017  | 0,021                   | -0,012           | 0,005          | 0,069  | 0,070                   | 14 858 m                       | RENN               |
| CIN1    | -0,013          | -0,009         | 0,016  | 0,023                   | -0,006           | -0,012         | 0,012  | 0,018                   | 15 075 m                       | Teria              |
| COR1    | -0,014          | -0,005         | 0,058  | 0,060                   | -0,005           | 0,003          | 0,056  | 0,056                   | 15 258 m                       | Teria              |
| PAR1    | -0,018          | -0,006         | 0,022  | 0,029                   | -0,017           | -0,013         | 0,019  | 0,029                   | 15 280 m                       | =                  |
| LVE1    | -0,012          | -0,011         | 0,029  | 0,034                   | -0,007           | -0,007         | 0,026  | 0,028                   | 20 222 m                       | Teria              |
| Moyenne | -0,007          | -0,010         | 0,024  | 0,031                   | -0,005           | -0,008         | 0,020  | 0,028                   |                                |                    |

Figure 36 : Comparaison Station de Rennes et réseau Teria

Après comparaison des deux modes de détermination en temps réel, il s'avère que le réseau Teria donne les mêmes résultats ou de meilleurs que la station de Rennes seule dans 80 % des cas. Ceci ne paraît pas étonnant. En effet, le réseau Teria s'appuyant sur plusieurs stations de référence réparties sur toute la France et notamment celle de Rennes, la détermination de coordonnées est meilleure, car il y a une compensation des coordonnées rendue possible grâce aux mesures surabondantes. L'utilisation du réseau Teria est donc à préconiser quand ce dernier est accessible et que la station de Rennes fonctionne bien dans le réseau.

Les constructeurs donnant une précision en fonction de la longueur de la ligne de base, on pourrait donc s'attendre à ce que plus on s'éloigne de la station de référence, moins bon est le résultat. Il s'avère que les résultats sont répartis beaucoup plus aléatoirement que cela. En effet, des points situés à 15 km de Rennes, exemple CIN1, ont des résultats tout aussi satisfaisants que des points situés à 5 km. Aucune tendance ne se dégage de ces résultats, il faut donc à tout moment rester vigilant pour obtenir les résultats les plus corrects.

### 3.2.1.3 Préconisations sur le calcul en post traitement

Pour optimiser les résultats en post traitement, de nombreux paramètres ont été testés tels que l'utilisation des éphémérides précises ou bien encore l'utilisation du GNSS ou du GPS.

Chaque point a dû être calculé indépendamment du fait qu'aucune mesure n'a pu être réalisée simultanément.

Plusieurs modes de calculs ont ainsi été testés : le calcul avec seulement la station de référence de Rennes, l'utilisation de plusieurs stations de référence et donc la réalisation d'un ajustement ou bien encore le mode de calcul préconisé par le CNIG. Il en ressort que la meilleure solution à adopter dépend du logiciel de traitement. Pour LGO, un calcul avec seulement la station de référence de Rennes donne les meilleurs résultats. Alors que sous TBC, un ajustement semi-contraint sur Rennes puis ensuite contraint avec les autres références donne les résultats les plus corrects (figure 68 annexe 7). Ces méthodes seront à préconiser pour le calcul de post traitement dans ces logiciels.

Quatre sortes d'éphémérides sont disponibles pour le calcul en post traitement : les radiodiffusées, les ultra rapides, les rapides et enfin les finales. Contrairement aux autres éphémérides, l'avantage des finales est qu'elles sont disponibles pour le GPS, mais également pour GLONASS. Les précisions et la disponibilité de l'ensemble de ces éphémérides sont présentes dans la figure 37.

| Type d'éphéméride       | Précision |         | Délai d'obtention* | Mise à jour     | Echantillonnage |
|-------------------------|-----------|---------|--------------------|-----------------|-----------------|
|                         | Position  | Horloge |                    |                 |                 |
| Radiodiffusée           | ~2,00 m   | ~7 ns   | 1 heure            | --              | journalier      |
| Prédite ou Ultra rapide | ~0,10 m   | ~5 ns   | 4 heures           | 4 fois par jour | 15 min          |
| Rapide                  | ~0,05 m   | ~0,2 ns | 1 jour             | quotidienne     | 15 min          |
| Finale                  | ≤0,05 m   | ~0,1 ns | 2 semaines         | hebdomadaire    | 15 min          |

Figure 37 : Description des éphémérides [IGN, 2013]

Après comparaison des résultats obtenus avec ces éphémérides, les finales permettent d'augmenter la précision sur les lignes de base et ainsi de se rapprocher de la valeur vraie de quelques millimètres seulement comparés aux radiodiffusées (figure 69 annexe 7). De plus, elles influencent principalement l'altitude. Étant donné que les éphémérides finales sont obtenues dans les quinze jours, leur utilisation signifie que le travail ne sera finalisé qu'autant de temps après. Leur utilisation est donc conseillée lorsque l'on cherche à obtenir de très bonnes classes de précision.

Le logiciel de calcul de Leica choisit automatiquement la meilleure solution entre le calcul GNSS ou GPS seul. Il s'avère qu'il choisit le plus souvent de calculer sans GLONASS. Le même test a été réalisé sous TBC et les résultats sont similaires. Les calculs avec seulement le GPS donnent des résultats plus corrects d'environ 1 mm en altitude (figure 70 annexe 7) ; quant à elle, la planimétrie ne varie pas.

Suite à ces tests GNSS, on peut considérer qu'il est possible d'obtenir une classe de précision de 1 cm en altimétrie dans des conditions optimales en post traitement. Si l'on souhaite avoir quelque chose de plus réaliste, il faudrait remonter cette classe de précision à 2 cm voir 2,5 cm. Dans tous les cas, la classe de précision de 2 cm en planimétrie est réalisable en GNSS.

### 3.2.2 Étude des différentes solutions envisageables

Au terme de ces tests, plusieurs possibilités s'offrent à nous : la création d'un canevas peu dense et déterminé en X, Y et Z, la mise en place d'un autre plus dense, mais uniquement altimétrique. Enfin, il est également possible de n'envisager aucune création de canevas.

### 3.2.2.1 Création d'un canevas peu dense en XYZ

Tout comme la ville de Grenoble (paragraphe 2.4.1), l'une des premières solutions envisageable est la création d'un canevas peu dense XYZ. La planimétrie et l'altimétrie pourraient être différenciées afin d'assurer de façon plus pérenne la stabilité du canevas.

En effet, le canevas planimétrique serait matérialisé par des repères au sol et le canevas altimétrique serait réalisé grâce à des repères de nivellement positionnés dans les murs. À chaque point planimétrique serait alors associé un repère de nivellement. Le canevas altimétrique serait ainsi plus stable et plus facile à maintenir dans le temps.

Le nombre de points du canevas dépendrait principalement du budget alloué à ce projet. En effet, un minimum de quatre points par commune serait nécessaire pour réaliser des rattachements par cheminement tachéométrique, mais cela nécessiterait pratiquement huit mois d'observation GNSS si l'on considère la mesure d'un point par jour. De plus, quatre points ne seraient pas suffisants dans certaines agglomérations fortement urbanisées.

Une autre solution serait le rattachement par méthode GNSS et non par cheminement. Un seul point pourrait alors être mis en place et permettrait l'initialisation des récepteurs GNSS afin d'éviter tout problème lié à cette initialisation. Ces problèmes sont de moins en moins fréquents, mais peuvent encore arriver et sont principalement liés aux multi-trajets et aux masques. Un fichier avec les écarts par rapport aux valeurs vraies pourrait être demandé, ce qui permettrait un premier contrôle et validerait le rattachement planimétrique au canevas.

Ce canevas mis en place en post traitement, répondrait aux précisions souhaitées. Cependant, étant peu dense, la précision altimétrique requise de 1,5 cm pour certains objets serait difficile à obtenir sans nivellement direct. Et ce dernier serait très fastidieux à réaliser si le canevas n'est pas densifié davantage.

Avec la mise en place de ce canevas, le contrôle de l'altimétrie des prestations pourrait se faire en deux temps. Tout d'abord, un premier sondage serait réalisé par méthode GNSS. Si des écarts apparaissent, le nivellement direct serait nécessaire. Une autre possibilité de contrôle est de vérifier l'homogénéité des stations de la polygonation en réalisant un nivellement direct ou même indirect entre stations. Quant au contrôle de la planimétrie, il se réaliserait comme sur la Ville de Rennes au moyen du GNSS. Le nombre de points mis en place pour le canevas faciliterait plus ou moins l'application de l'arrêté de 2003 sur les classes de précisions.

### 3.2.2.2 Création d'un canevas altimétrique

Comme nous l'avons vu précédemment dans cette étude, la détermination altimétrique afin de respecter les classes de précisions demandées s'avère plus contraignante que la planimétrie. Une autre solution serait basée sur la création d'un canevas altimétrique avec la mise en place d'un point en planimétrie dans chaque commune pour l'initialisation des récepteurs GNSS. Cette solution permettrait de faciliter le respect de la classe de précision de 1 cm en altimétrie par les prestataires. Par ailleurs, d'après les résultats des tests GNSS, la classe de précision planimétrique de 2 cm pourra être réalisée aussi bien en post traitement qu'en temps réel. Libre choix par la suite aux prestataires d'utiliser les méthodes qui leur conviennent. En effet, depuis l'arrêté de 2003 sur les classes de précision, dans les marchés publics, la méthode ne peut pas être imposée, seules des préconisations peuvent être faites.

Pour quantifier les besoins en repères de nivellement et ainsi chiffrer le coût de cette opération, un traitement sous le logiciel Arcgis d'ESRI a pu être fait. Deux scénarios ont ainsi été réalisés. Un premier avec une densification minimale, c'est-à-dire que chaque repère se trouve à moins d'un kilomètre d'un autre. Pour le second, une densification optimale est prévue, chaque zone d'action d'un repère est à moins de 500 mètres l'une de l'autre. Dans ce but, des zones tampons de 500 mètres et d'un kilomètre ont été réalisées autour de chaque repère de nivellement.

Puis, les zones de recouvrement ont été gardées, elles matérialisent les zones d'action communes à au moins deux repères. Cela signifie que dans ces zones, nous nous trouvons à moins de 500 mètres ou un kilomètre de deux repères de nivellement et que l'on aura à réaliser respectivement au maximum un kilomètre ou deux kilomètres de cheminement pour se rattacher sur deux repères. Ces zones représentent donc les endroits où le contrôle de stabilité est facilité. Les zones non couvertes par l'intersection de ces zones tampons sont à densifier. La figure 38 représente un exemple sur la commune de Chartre-de-Bretagne. Deux repères seraient suffisants au minimum dans le cas à gauche alors que six permettraient d'avoir une bonne densification (image de droite).

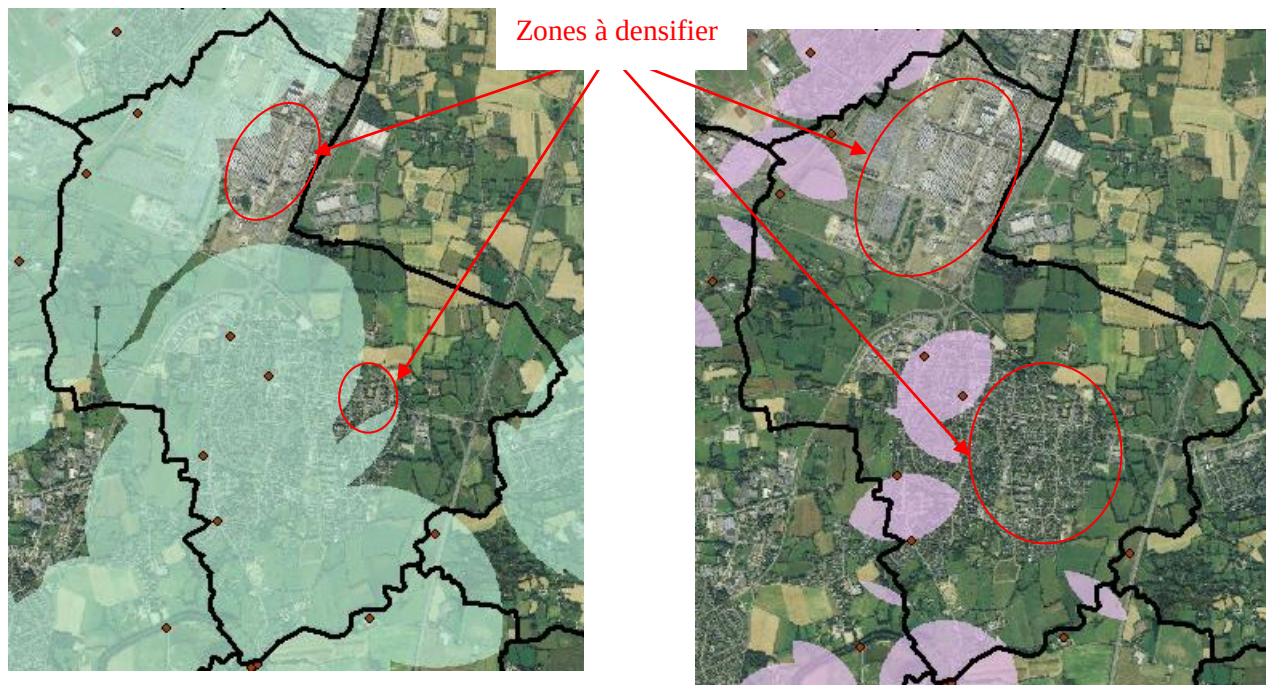


**Figure 38 : À gauche, densification minimale. À droite, densification optimale.**

Dans le cas où tous les repères de l'IGN seraient présents (environ 650 repères sur l'ensemble des 38 communes), 50 repères supplémentaires seraient suffisants pour une densification minimale et 150 pour une densification optimale.

Une estimation du temps passé sur la réalisation du canevas par le service SIG a été réalisée. Avec une moyenne de six kilomètres de nivellement direct par jour et une moyenne également de six kilomètres pour densifier une commune (sachant que certaines n'ont besoin que d'un seul point supplémentaire), le canevas pourrait être mis en place en deux à trois mois par le service. Une estimation chiffrée a été faite à partir des temps de réalisation estimée. En considérant un agent de maîtrise principal et un adjoint technique, nous obtenons un coût de 14 000 euros hors taxes pour deux mois de nivellement et 21 000 euros pour trois mois. À cela s'ajoute un mois d'inspection des repères pour vérifier que les points n'ont pas disparu avec un coût de 4 000 euros. Pour choisir l'emplacement futur des repères, une période de quinze jours supplémentaires serait nécessaire par un technicien pour un montant de

2 250 euros. Il faut également ajouter le prix et le temps de la matérialisation des repères sur le terrain qui n'ont pour le moment pas été chiffrés. Cela nous amène à un coût compris entre 20 250 et 27 250 euros hors taxes sans la matérialisation.

Un devis est également en cours de réalisation par les services de l'IGN. En première étape, les repères disparus doivent être identifiés, l'IGN propose de le réaliser pour un montant de 13 690 euros hors taxes. L'option de le faire en interne sera donc choisie du fait du coût élevé de cette prestation.

Après localisation de ces points disparus, il faudra déterminer l'emplacement des nouveaux repères pour que l'IGN puisse déterminer le nombre de kilomètres de cheminement et donc réaliser un premier devis. Le plus gros du travail sera alors effectué, c'est-à-dire la localisation des nouveaux repères. Ne restera plus qu'à les mettre en place et réaliser le nivellement direct. La réalisation en interne coûtera dans tous les cas moins cher qu'un travail réalisé en externe. À titre indicatif et pour avoir un premier aperçu du coût de la prestation, l'IGN nous a fourni le prix d'une opération à Dunkerque. Pour 37 km de nivellement, 139 repères à niveler dont 52 à sceller, le prix de la prestation est de l'ordre de 21 000 euros hors taxes.

Enfin, la densification en zone peu urbanisée (hors centre bourg) s'est également posée. La méthode de nivellement par GNSS proposée par l'IGN n'est pas à préconiser du fait de la précision centimétrique de cette dernière. Il est préférable dans ce cas contraint, de déterminer l'altitude de deux points en post traitement et, depuis ces deux points, de réaliser du nivellement direct pour densifier.

L'application de l'arrêté de 2003 sur les classes de précision se ferait de la même façon que le cas précédent, mais le nivellement direct serait plus simple à mettre en place. Le contrôle prendrait donc moins de temps, et la première livraison des données par les prestataires seraient de meilleure qualité.

### 3.2.2.3 Pas de création de canevas

Une autre solution envisageable est de ne réaliser aucun canevas. Il serait alors à la charge des prestataires qui devraient le mettre en place au coup par coup. Le principal avantage de cette solution est qu'elle ne coûte rien directement à la collectivité. Cependant, les coûts des prestations topographiques futures seraient plus élevés du fait que les prestataires auraient à créer leur propre canevas et auraient sûrement plus de difficultés pour respecter les classes de précision imposées en altimétrie.

Les classes de précision souhaitées seraient difficilement atteignables au GNSS. En effet, comme nous avons pu le voir dans les tests GNSS, la classe de précision altimétrique de 1 cm n'est respectée que dans certaines conditions très spécifiques. Ces conditions ne peuvent pas être imposées dans un marché public topographique. En effet, seules des préconisations peuvent être faites, c'est donc au prestataire de choisir la méthode qu'il juge la plus pertinente pour atteindre la classe de précision souhaitée. Néanmoins, la classe de précision de 1 cm en altimétrie pourrait être conservée, ce qui l'obligerait à réaliser du nivellement direct. Cependant, comme toutes les communes ne sont pas bien desservies en repère de nivellement, cela pourrait également faire augmenter le coût des prestations.

De plus, les tests réalisés permettent de dire que la classe de précision altimétrique nécessite d'être augmentée, passant de 1 cm à 2 cm voir 2,5 cm, pour permettre aux prestataires de réaliser leur propre canevas au GNSS. Cependant, la détermination de l'altimétrie par GNSS pose le problème de l'homogénéité des levés, du fait de l'indépendance des mesures, contrairement au nivellement direct. Quant à la planimétrie, la classe de précision de 2 cm serait réalisable sans canevas, car étant respectée même avec le temps réel.

Enfin, si aucun canevas n'était créé, l'application de l'arrêté sur les classes de précisions serait plus difficile à mettre en place. La planimétrie serait comme dans les autres cas contrôlée au GNSS. Au niveau de l'altimétrie, comme dans les autres cas, des premiers sondages pourraient être réalisés au GNSS et le nivellement direct serait nécessaire si des écarts apparaissaient. Ces nivellements directs seraient alors très fastidieux à mettre en place et nécessiteraient donc beaucoup de temps. La vérification de l'homogénéité des stations par nivellement direct ou indirect peut être une solution envisageable dans ce cas.

### **3.2.3 Solution choisie**

#### **3.2.3.1 Justifications**

À l'heure actuelle, aucune solution n'a encore été choisie. Cependant, le choix d'un canevas altimétrique se dessine. En effet, il a été décidé de retenir 1 cm en classe de précision altimétrique et 2 cm en planimétrie. La création et la matérialisation d'un canevas altimétrique permettront aux futurs prestataires de réaliser leurs prestations dans de meilleures conditions en leur facilitant le respect des classes de précision altimétrique. Cela permettra sûrement une baisse du coût des prestations, ainsi qu'une baisse du coût interne de réception des prestations. La mise en place d'un canevas peu dense XYZ est mise de côté du fait qu'il se révèle plus coûteux. La dernière solution est également exclue. Ne pas créer de canevas entraînerait des complications par la suite pour que les prestataires respectent les classes de précision demandées. Pour pouvoir valider la création d'un canevas altimétrique, le projet doit être présenté en bureau et commission aux élus, car celui-ci va nécessiter un budget.

La mise en place d'un canevas altimétrique nécessite donc de répertorier l'ensemble des repères encore existants sur Rennes Métropole. Cette étape devrait voir le jour d'ici peu. Par la suite, il faudra localiser précisément l'emplacement des nouveaux repères. Après cette étape, l'IGN sera dans la possibilité de fournir son devis exact. Si les frais paraissent trop importants, le service SIG pourra décider de réaliser le nivellement direct en interne. Dès lors, la densification pourra se faire par phase selon les besoins des prestataires et les disponibilités des agents.

Une possibilité de co-financement de cette solution avec l'IGN est également étudiée. L'IGN, moyennant financement, pourrait alors récupérer les repères pour les intégrer dans sa base et les mettre à disposition de tous.

#### **3.2.3.2 Mise à disposition des données**

Bien que Rennes Métropole mette à disposition en open data certaines données, celles du canevas ne le sont pas. Une réflexion sur la disponibilité de ces données de canevas est en cours. En effet, aujourd'hui, les données du canevas de la Ville de Rennes ne sont pas en accès libre pour les prestataires. Une demande doit être réalisée au service SIG pour que ce dernier fournisse les fiches signalétiques. Ainsi, le service SIG peut s'assurer que les interventions des prestataires ne relèvent pas de ses missions directes ou que les données n'existent pas déjà, dans le cas de commandes faites par les autres services ou les concessionnaires d'aménagement. Certaines collectivités, comme par exemple Le Grand Lyon, mettent à disposition leurs canevas en accès libre et gratuit. Rennes Métropole envisage de faire de même. L'avantage de cette solution sera d'alléger le travail de diffusion des données.

### **3.3. Aspects administratifs**

Un Cahier des Prescriptions Topographiques très détaillé existe à la Ville de Rennes depuis 2004. Actualisé en 2008, puis étendu en 2010 à Rennes-Métropole, il nécessite une importante rénovation actuellement en cours. Les objectifs sont notamment de clarifier et de prendre en compte les particularités de Rennes Métropole dans les spécifications.

#### **3.3.1 Encadrement des prestations**

##### **3.3.1.1 Systèmes de références géographiques**

L'utilisation des systèmes de coordonnées va donc évoluer. Le chapitre du cahier des prescriptions topographiques du service SIG de Rennes Métropole concernant les systèmes de références géographiques a donc été actualisé. Il prend maintenant en compte l'utilisation du REN09 intra-rocade, l'emploi du CC48 extra-rocade, le rattachement au système altimétrique restant sur le NGF IGN69. Tout cela est décrit dans l'annexe 9.

##### **3.3.1.2 Classes de précision**

Les indications relatives aux classes de précision n'ont pas évolué, puisque celles-ci restent identiques sur la Ville de Rennes et Rennes Métropole. Une diminution du dimensionnement de l'échantillonnage des points de contrôle est cependant en cours, il est décrit dans l'annexe 9.

#### **3.3.2 Contrôle de l'altimétrie**

Pour le moment, le contrôle sur la Ville de Rennes consiste en un contrôle d'échantillon de points. Celui-ci porte sur le carré du logarithme népérien du nombre de points levés par le prestataire. En général, les points contrôlés sont les plus caractéristiques (stations, bouches à clé, angle de plaques ...). Cette méthode prend beaucoup de temps et la taille des échantillons est vite importante. Avec la multiplication des prestations à contrôler, cette méthode va vite atteindre ses limites.

Ma recommandation est donc que les points à contrôler correspondent seulement à des sommets de polygonalement. Cependant, le contrôle serait maintenu à toutes les prestations. Un premier sondage sera réalisé par méthode GNSS en observant une à deux sessions de cinq minutes sur chaque point à contrôler.

Si des écarts apparaissent entre les données de contrôle et celles des prestataires, un nivellement direct sera nécessaire. Avec ces résultats, l'arrêté de 2003 sur les classes de précision pourra être appliqué, c'est-à-dire vérifier que l'écart moyen en position est inférieur à une valeur qui est fonction de la classe de précision et du coefficient de sécurité. Il faudra également vérifier que le premier seuil n'est pas dépassé par plus d'un certain nombre de points et que le second seuil n'est jamais dépassé (on devra se référer aux formules décrites dans l'arrêté du 16 septembre 2003 portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'État, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte).

Si les points de la polygonation sont déjà déterminés par le prestataire en nivellement direct, il est compliqué de réaliser une méthode deux fois plus précise pour appliquer l'arrêté sur les classes de précision, c'est-à-dire un coefficient de sécurité égal à deux. Un nivellement avec la méthode de cholesky pourrait être réalisé, mais est très compliqué et long à mettre en œuvre.

Enfin, une autre solution qui permet le contrôle de l'altimétrie, mais pas l'application de l'arrêté sur les classes de précision, est la vérification de l'homogénéité de l'altitude au niveau du chantier. Pour ce faire, un nivellement direct, dans le meilleur des cas, ou indirect pourrait être réalisé entre stations et permettrait de vérifier que l'ensemble du chantier ou du moins les stations sont homogènes en altimétrie.

### **3.3.3 Recommandation de méthodes pour les prestataires**

Une fiche de recommandation liée aux techniques GNSS a été réalisée et sera fournie aux prestataires par le biais du cahier des charges, annexe 9.

## **3.4. Conclusion**

Cette partie a permis de réaliser le choix du système géodésique sur l'ensemble de l'agglomération de Rennes. Après analyse des différentes possibilités, l'option du REN09 intra-rocade a été choisie. En effet, cette dernière est la moins contraignante. Elle permet de garder les avantages du REN09 intra-rocade et de faciliter les nombreux échanges qui auront lieu en dehors de la rocade. Enfin, une solution sur la mise en place d'un canevas a été suggérée. La réalisation d'un canevas altimétrique est la solution la plus cohérente avec les précisions requises de 2 cm en planimétrie et de 1 cm en altimétrie. Cependant, pour que cette solution soit définitivement adoptée, elle devra être proposée et validée en Comité Technique SIG. Il s'agit d'une commission priorisant les opérations menées par le service SIG en fonction de la charge de travail identifiée et/ou du budget requis.

## Partie 4

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Depuis les prémices de la topographie moderne, des canevas planimétriques et altimétriques ont été le support de prestations topographiques de qualité. Les techniques de mise en place de ces canevas n'ont guère évolué pendant des décennies jusqu'à la démocratisation des techniques GNSS. En effet, ces dernières permettent le positionnement rapide et précis de point en planimétrie. Cependant, nous avons pu voir que la détermination de l'altimétrie était plus compliquée à mettre en œuvre. Celle-ci n'est pas impossible, mais nécessite des moyens techniques et des connaissances particulières.

Le service SIG de la Ville de Rennes a mis en place depuis les années 1980 un canevas qui est le support des levés de surface et de sous-sol de la ville. Celui-ci est aujourd'hui très dense et comprend plus de 9 000 stations et 1 500 repères de nivellement, il a pour classes de précision 2 cm en planimétrie et 1 cm en altimétrie. Depuis 2010, avec la mutualisation des services de la Ville de Rennes et de Rennes Métropole, les compétences du service SIG se sont étendues sur l'ensemble de l'agglomération rennaise. La question de l'extension du canevas existant de la Ville de Rennes sur l'ensemble de l'agglomération se pose alors. Tout reste à faire sur Rennes Métropole hors Ville de Rennes car seul le réseau de point IGN est présent sur ce territoire. Les besoins en matière de précision ont dû être éclaircis. Il s'avère après réflexion, que les précisions pratiquées sur la Ville de Rennes seront appliquées à toute l'agglomération. Par ailleurs, la Ville de Rennes utilise un système géodésique particulier. En effet, en 2009 l'ancien système a été remplacé par un nouveau applicable sur Rennes Métropole suite à la validation de la seconde ligne de métro. Baptisé REN09, il a le principal avantage d'avoir une altération linéaire quasi nulle de l'ordre du millimètre par kilomètre, mais également de pouvoir être intégrable dans les logiciels de SIG. Cependant, avec le décret de 2000 sur l'obligation de diffusion de données dans un système légal, le service SIG se pose aujourd'hui la question du système géodésique à appliquer sur Rennes Métropole.

Suite à de nombreux scénarios, il a été décidé que le REN09 ne sera pas étendu à toute l'agglomération, mais ramené dans un périmètre intra-rocade. Le reste de l'agglomération sera donc en CC48. En effet, cette solution est la moins contraignante de toutes du fait que le fonctionnement actuel sur la Ville de Rennes est maintenu. De plus, les avantages du REN09 seront conservés, notamment pour les besoins du métro. Cela ne signifiera pas de charge de travail supplémentaire, car les principaux projets gérés actuellement par le service SIG se localisent à l'intérieur de la rocade. Le travail lié à l'assistance technique sera donc toujours présent, mais pas augmenté. Cette solution peut être considérée comme une transition douce au passage de toute la métropole en système légal CC48.

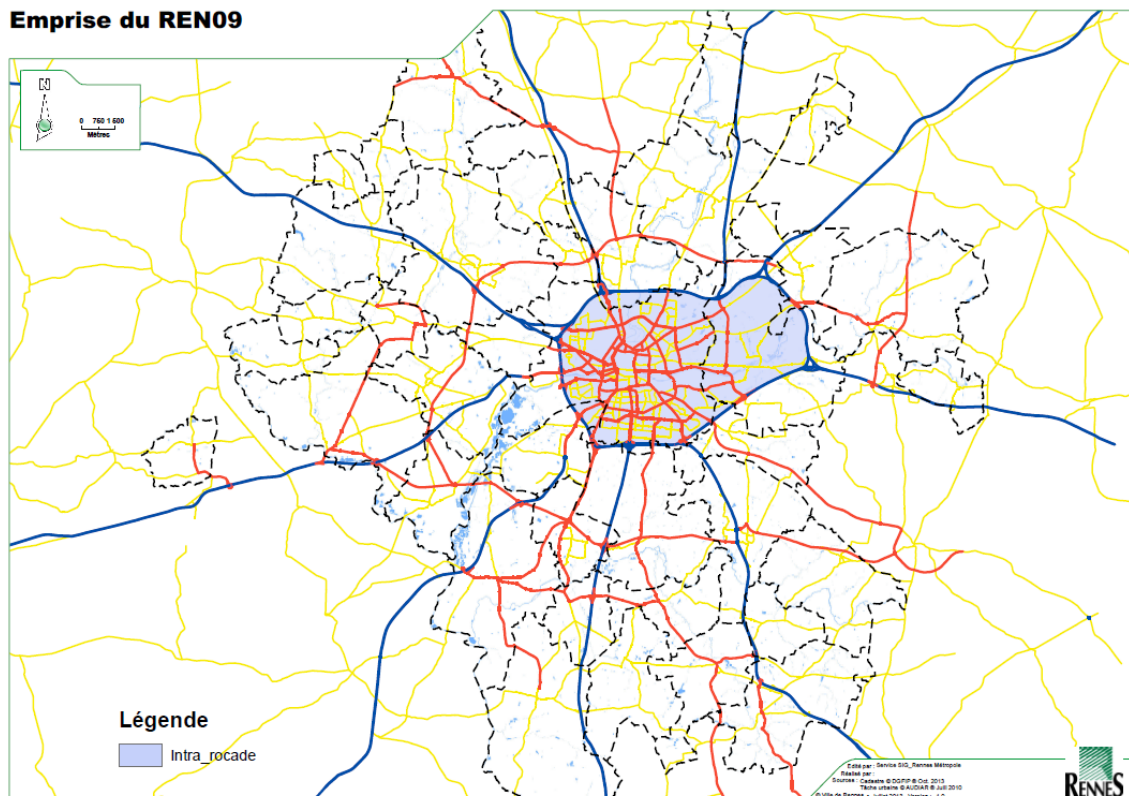


**Figure 39 : Solution choisie pour le système géodésique, REN09 intra-rocade.**

Le choix du système de coordonnées planimétrique a donc été fait, mais pourra évoluer au cours du temps en fonction du retour sur expérience de l'utilisation de ce dernier. Il faudra également informer l'ensemble des utilisateurs sur le choix réalisé.

La mise en place d'un canevas peu dense en XYZ ainsi qu'aucune création de canevas ont pu être des solutions envisageables, mais non retenues. Le choix n'a pas encore été officiellement réalisé du fait qu'un budget doit être voté pour ce projet. Cependant, la réalisation d'un canevas altimétrique est la solution qui sera proposée. En effet, la création et la matérialisation de celui-ci permettront aux futurs prestataires de réaliser leurs prestations dans de meilleures conditions et de leur faciliter le respect des classes de précision altimétrique. Si ce projet voit le jour, il restera à définir les modalités de mise en place de ce dernier.

Ce PFE a également permis de tester les performances de la technique GNSS actuelle. Cependant, avec l'arrivée très prochaine sur le marché du système de positionnement par satellite GALILEO, les conclusions obtenues lors de ce projet pourraient évoluer. De plus, d'ici la fin de l'année, une grille de transformation des altitudes devrait voir le jour dans l'Ouest du pays s'appuyant sur les points de triplets. Tout cela permettra d'obtenir des résultats meilleurs concernant l'altimétrie, qui reste le point faible du GNSS. Ainsi, le nivellement par GNSS pourrait gagner en précision et être de plus en plus utilisé. De nouvelles techniques, dont notamment le PPP, devraient également se démocratiser et permettre de nouvelles applications dès lors que les constructeurs auront intégré ce mode de calcul dans leurs récepteurs GNSS. Des techniques permettant le maximum de précision sont toujours recherchées dans notre domaine. Il faudra donc rester à l'affût des nouvelles technologies notamment celles liées au GNSS qui tend à des résultats de plus en plus performants. Mais il ne faudra pas tomber dans le piège de la précision, c'est-à-dire ne pas rechercher à tout prix et ne pas imposer le maximum de précision pour des travaux qui ne le nécessitent pas.

# LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Exemple de triangulation de la NTF dans le Limousin, [IGN, 2013].                                                                                               | 6  |
| Figure 2 : Carte d'avancement prévisionnel de l'entretien du réseau de nivellement par les triplets, [IGN, 2013].                                                          | 7  |
| Figure 3 : Schéma des observations rendues possibles par l'existence de triplets, [IGN, 2013].                                                                             | 8  |
| Figure 4 : Mode absolu.                                                                                                                                                    | 8  |
| Figure 5 : Mode différentiel.                                                                                                                                              | 8  |
| Figure 6 : Précision des observations GPS et GPS/GLONASS pour trois stations de l'IGS [Grinter & Roberts, 2011].                                                           | 10 |
| Figure 7 : Représentation des différentes altitudes, [Nocquet et al, 2000, modifié]                                                                                        | 11 |
| Figure 8 : Descriptif des fiches [Legros, 2013].                                                                                                                           | 13 |
| Figure 9 : Réseau de Référence français, [Systèmes géodésiques locaux et spatiaux, 2013].                                                                                  | 15 |
| Figure 10 : Schéma de principe du nivellement pas GNSS, [Varidel & Chapuis, 2002].                                                                                         | 16 |
| Figure 11 : Résultats de comparaison après ajustement entre les hauteurs du géoïde gravimétrique et les hauteurs déterminées par GNSS/nivellement, [Ben Ahmed Daho, 2003]. | 17 |
| Figure 12 : Réseau de triangulation du Maroc, [El Fettah, 2003].                                                                                                           | 18 |
| Figure 13 : Réseau de référence et de base au Maroc, [Dazir, 2011].                                                                                                        | 19 |
| Figure 14 : Canevas Israélien, [Srebro, 2009].                                                                                                                             | 20 |
| Figure 15 : Boucles 15 et 16, [Tuchin et al, 2009].                                                                                                                        | 20 |
| Figure 16 : Carte des communes de Rennes Métropole.                                                                                                                        | 24 |
| Figure 17 : Schéma de triangulation et de la polygonale de la Ville de Rennes pour la mise en place du VDR 79.                                                             | 27 |
| Figure 18 : Systèmes de coordonnées utilisés à Rennes avant 2009 [Guillot, 2008].                                                                                          | 29 |
| Figure 19 : Comparaison du Géoïde et des ellipsoïdes à Rennes.                                                                                                             | 30 |
| Figure 20 : Projection conique conforme de Rennes.                                                                                                                         | 31 |
| Figure 21 : Valeurs de l'altération linéaire en CC48 et REN09 [Guillopé, 2008].                                                                                            | 31 |
| Figure 22 : Altération linéaire du REN_IGN et Rennes 2009 [Harmel, 2008].                                                                                                  | 32 |
| Figure 23: Problème lié à la transformation de coordonnées                                                                                                                 | 41 |
| Figure 24 : REN09 sur la Ville de Rennes.                                                                                                                                  | 42 |
| Figure 25 : REN09 sur la Ville de Rennes et les ZAC limitrophes.                                                                                                           | 42 |
| Figure 26 : REN09 intra rocade.                                                                                                                                            | 43 |
| Figure 29: Avantages inconvénients de chaque solution.                                                                                                                     | 44 |
| Figure 27 : Définition des aires urbaines selon l'INSEE.                                                                                                                   | 44 |
| Figure 28 : Définition des aires urbaines selon l'AUDIAR.                                                                                                                  | 44 |
| Figure 30 : Écarts entre le post traitement/coordonnées connues et entre le temps réel/coordonnées connues avec le récepteur GNSS Trimble R8 sur Ville de Rennes.          | 47 |
| Figure 31 : Écarts entre le post traitement/coordonnées connues et entre le temps réel/coordonnées connues avec le récepteur GNSS Leica Viva GS15 sur Ville de Rennes.     | 47 |
| Figure 32 : Villes tests sur Rennes Métropole.                                                                                                                             | 48 |
| Figure 33 : Comparaison planimétrique des différents logiciels.                                                                                                            | 49 |
| Figure 34 : Écarts entre le post traitement/coordonnées connues et entre le temps réel/coordonnées connues avec le récepteur GNSS Trimble R8 sur le point du RBF.          | 49 |
| Figure 35 : Différences d'altitude entre logiciels.                                                                                                                        | 50 |
| Figure 36 : Comparaison Station de Rennes et réseau Teria.                                                                                                                 | 51 |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 37 : Description des éphémérides [IGN, 2013].....                                                                          | 52  |
| Figure 38 : À gauche, densification minimale. À droite, densification optimale. ....                                              | 54  |
| Figure 39 : Solution choisie pour le système géodésique, REN09 intra-rocade. ....                                                 | 60  |
| Figure 40 : Le contrôle des unités.      Figure 41 : Le choix du mètre.....                                                       | 78  |
| Figure 42 : Outil pour attribuer un système de coordonnées.....                                                                   | 79  |
| Figure 43 : La liste des systèmes de coordonnées.....                                                                             | 79  |
| Figure 44 : Affichage du Volet Taches. ....                                                                                       | 80  |
| Figure 45 : Association des dessins source dans l'Explorateur de carte. ....                                                      | 81  |
| Figure 46 : Sélection du dessin à associer. ....                                                                                  | 81  |
| Figure 47 : Attribution d'un système de coordonnées au dessin source. ....                                                        | 82  |
| Figure 48 : Outil de définition d'une requête.....                                                                                | 82  |
| Figure 49 : Paramètres de la requête. ....                                                                                        | 83  |
| Figure 50 : Paramètres d'Emplacement. ....                                                                                        | 83  |
| Figure 51 : Modification du mode de requête. ....                                                                                 | 84  |
| Figure 52 : Sélection du zoom étendu. ....                                                                                        | 85  |
| Figure 53 : Dissocier un dessin associé.....                                                                                      | 85  |
| Figure 54 : Répartition des écarts des données moyennes du Trimble R8 en temps réel sur Ville de Rennes. ....                     | 98  |
| Figure 55 : Répartition des écarts des données du Trimble R8 en post traitement sur Ville de Rennes. ....                         | 98  |
| Figure 56 : Répartition des écarts des données moyennes du Leica GS15 en temps réel sur Ville de Rennes. ....                     | 98  |
| Figure 57 : Répartition des écarts des données du Leica GS15 en post traitement sur Ville de Rennes. ....                         | 99  |
| Figure 58 : Ecart en planimétrie des points sur Rennes Métropole avec la technique du temps réel. .                               | 99  |
| Figure 59 : Répartition des écarts planimétriques des données du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole. ....              | 99  |
| Figure 60 : Répartition des écarts planimétriques des données moyennes du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole.....      | 100 |
| Figure 61 : Ecart en altimétrie des points sur Rennes Métropole avec la technique du temps réel. ..                               | 100 |
| Figure 62 : Répartition des écarts planimétriques des données individuelles du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole..... | 100 |
| Figure 63 : Répartition des écarts planimétriques des données moyennes du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole.....      | 101 |
| Figure 64 : Ecart en altimétrie des points sur Rennes Métropole avec la technique du post traitement. ....                        | 101 |
| Figure 65 : Répartition des écarts altimétriques du Trimble R8 en post traitement Bernese sur Rennes Métropole. ....              | 101 |
| Figure 66 : Répartition des écarts altimétriques du Trimble R8 en post traitement LGO sur Rennes Métropole. ....                  | 102 |
| Figure 67 : Répartition des écarts altimétriques du Trimble R8 en post traitement TBC sur Rennes Métropole. ....                  | 102 |
| Figure 68 : Écart altimétriques du Trimble R8 et du Leica Viva en fonction du logiciel.....                                       | 102 |
| Figure 69 : Comparaison des écarts en altitude en fonction des éphémérides. ....                                                  | 103 |
| Figure 70 : Comparaison des écarts en altitude en fonction de la constellation satellitaire. ....                                 | 103 |
| Figure 71 : Création d'une nouvelle étude.....                                                                                    | 105 |
| Figure 72 : Changer le masque à 15 degré. ....                                                                                    | 106 |
| Figure 73 : Mettre l'étude dans le bon système de coordonnées.....                                                                | 106 |

## Liste des figures

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 74 : Importation du fichier de levé.....                                                  | 107 |
| Figure 75 : Importer les données des stations de référence disponible sur le site de l'IGN. .... | 107 |
| Figure 76 : Vue temporelle.....                                                                  | 108 |
| Figure 77 : Éditer les sessions. ....                                                            | 108 |
| Figure 78 : Choisir les éphémérides. ....                                                        | 109 |
| Figure 79 : Point de référence en qualité du contrôle.....                                       | 109 |
| Figure 80 : Traiter les lignes de base.....                                                      | 110 |
| Figure 81 : Rapport de traitement des lignes de base. ....                                       | 110 |
| Figure 82 : Exemple de poursuite.....                                                            | 111 |
| Figure 83 : Exemple de résidus sur le satellite G2. ....                                         | 111 |
| Figure 84 : Ajuster le réseau.....                                                               | 112 |
| Figure 85 : Pondération. ....                                                                    | 112 |
| Figure 86 : Rapport d'ajustement. ....                                                           | 113 |
| Figure 87 : Ajuster en gardant seulement 3 points en 2D. ....                                    | 113 |
| Figure 88 : Rapport d'ajustement. ....                                                           | 114 |
| Figure 89 : Après analyse sélection des points et ajustement.....                                | 114 |
| Figure 90 : Ellipse d'erreur sur le point calculé.....                                           | 115 |

# BIBLIOGRAPHIE

Abeyratne, P.G.V., Featherstone, W.E. & Tantrigoda, D.A. (2010), 'On the geodetic datums in Sri Lanka', Survey Review, vol.42, no.317, pp. 229-239.

Amos, M. & Featherstone, W. (2009), 'Unification of New Zealand's local vertical datums: iterative gravimetric quasigeoid computations', Journal of Geodesy. No.83, pp. 57-68.

Amos, M. (2010), 'New Zealand vertical datum 2009', New Zealand surveyor, no.3, pp 5-16.

‘Arrêté du 16 septembre 2003 portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'Etat, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte’ [Online].

Available:<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000794936&dateTexte=&categorieLien=id> [Accessed 4 February 2013].

Ben Ahmed Daho, S. (2003), 'Calcul des hauteurs orthométriques à partir des observations GPS : Cas d'étude : Nord de l'Algérie', 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003.

Boissenot, M., Col, F., Nurisso, P., Previtali, I., Gallara, F. & Lione, S. (2009), 'Suivis topometriques et geodesiques lies au projet de liaison ferroviaire', XYZ, no.119, pp 27-34.

Bonin, G. (1986), 'Utilisation du système GPS pour la détermination des coordonnées précises d'un point', XYZ, no.29.

Cayot, B. (2007). 'L'arrêté du 16 septembre 2003 sur les classes de précision –Contrainte nouvelle ou opportunité du passage au contrôle du résultat', ESGT,

Chassagne, O. (2012), 'Le futur de la navigation par satellites : une précision à un centimètre avec le PPP', XYZ, no.132, pp 47-52.

Cheng, P., Wen, H., Cheng, Y. & Wang, H. (2009), 'China Geodetic Coordinate System 2000', Eighteenth United Nations Regional Cartographic ,Conference for Asia and the Pacific, Bangkok, 26-29 October 2009.

Coulomb, A. (2009), 'Entretien du réseau de nivellement par les triplets', XYZ, no.119, pp 39-42.

Coulomb, A. (2013a) 'Mise au point sur les réseaux de géodésie et nivellement', XYZ, no.134, pp 33-36.

Coulomb, A. (2013b), 'Nivellement général de la France, L'entretien des triplets', Géomètre, no.2102, pp 46-48.

'Décret n° 2006-272 du 3 mars 2006 modifiant le décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics' [Online].

Available: <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000813996&dateTexte=&categorieLien=id> [Accessed 18 February 2013].

Dafir, Z. (2011), 'Cartographie et Géodésie Nationale', High level forum on global geospatial management information, Seoul, Republic of Korea, 24-26 October 2011.

Delbard, P. (1988) ' le système GPS pour la détermination d'un canevas géodésique', *Géomètre*, no.3, pp 48-50.

Duquenne, H., Everaerts, M. & Lambot, P. (2005a), 'Gravimétrie, géoïde et nivellement par GPS en Belgique', *XYZ*, no.105, pp 29-36.

Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Betaille, D., & Willis, P. (2005b), 'GPS, localisation et navigation par satellites', 2eme édition revue et augmentée, Hermès.

Durand, S. (2003), ' Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS : étude détaillée des équations d'observation et du problème de résolution des ambiguïtés entières', Mémoire de thèse à l'observatoire de Paris.

El Fettah, N. (2003), ' Vers une redéfinition du référentiel géodésique Marocain'.

Fosburgh, B. & Peetz, B. (2005), 'La modernisation du GPS', *XYZ*, no.105, pp 59-61.

Fund, F. (2009) ' Observations GPS et retards troposphériques : modélisations et application aux effets de surcharge océanique dans l'Ouest de la France', Mémoire de thèse à l'UFR sciences et techniques de l'université de Nantes.

Grinter, T. & Roberts, C. (2011), ' Precise Point Positioning: Where are we now?' International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium 2011, Sydney, Australia, 15-17 Novembre 2011.

Guillopé, B. (2002). 'Adaptation du système GPS à la projection VDR', Service SIG Ville de Rennes.

Guillopé, B. (2008). 'Changement des référentiels géographiques, création d'une nouvelle projection plane', Service SIG Ville de Rennes.

Guillot, G. (2008). 'Changement de référentiels géographiques à la Ville de Rennes', Mémoire de travail de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographe du Mans ESGT.

Harmel, A. (2008). 'Référentiel géographique de la Ville de Rennes, Compte-rendu d'expertise', IGN.

Kasser, M. (1998), 'GPS et nivellement', *Géomètre*, no.6, pp 31-47.

Kasser, M. (2013), 'La stabilisation d'un paysage plein de vitalité', *Géomètre*, no.2103, pp 32-38

Ledig, J. (2012), 'Pour le positionnement géodésique (G.N.S.S)', support de cours de Géodésie et GNSS, INSA Strasbourg, filière Topographie.

Legros, M. (2013), 'Méthodes de travail dans les réseaux GNSS', GéoPos la Commission Géopositionnement du CNIG.

Le Pape, M. (1991), 'Définition et réalisation du Réseau Géodésique Français', *XYZ*, no.47.

'Le portail de l'IGN' [Online]. IGN.

## Bibliographie

Available : <http://ign.fr/> [Accessed 13 February 2013].

Luzet, C. (1996), 'Evolution du canevas géodésique national', XYZ, no.69.

Miller, K., St. Clair, M., Hart, B., McClean, A., Sydney, P., Hutchinson, G., Clarke, A. & Gopee, A. (2009), 'Geodetic control on Barbados, West Indies', Survey Review, vol.41, no.312, pp 120-137.

Morel, J. (2011), 'Cahier des Prescriptions Générales de l'Espace Public', Service SIG Ville de Rennes.

Morel, L. (2013), 'Les réseaux de stations permanentes en France', Géomètre, no.2103, pp 40-43.

Mure, J. (2012), 'Amélioration du canevas planimétrique de la Compagnie Nationale du Rhône : Rattachement à la référence nationale, densification et mise en place d'un outil de gestion des données', Mémoire de projet de fin d'étude à l'INSA de Strasbourg.

Nocquet, JM., Duquenne, H., Boucher, C., Harmel, A. & Willis, P. (2000), 'Conversion altimétrique RGF93-IGN69 Correction des altitudes GPS en France' Groupe de Travail Permanent «Positionnement Statique et Dynamique».

'Office fédéral de topographie' [Online].Swisstopo.

Available: <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/topics/survey/procs/gps.html> [Accessed 21 February 2013].

Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. & Grinter, T. (2012), 'Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End?', FIG Working Week 2012, Rome, Italy, 6-10 May 2012.

Srebro, H. (2009), 'A Status Report of the Activity of the Survey of Israel', International Federation of Surveyors.

Tabti, L., Hasni, K., Kadri, C. & Mjahed, S. (2010) 'Combinaison linéaire et l'intérêt de la troisième fréquence pour le positionnement en double différence par GPS', XYZ, no.124, pp 31-35.

'Trimble Positioning Services' [Online].Trimble

Available : <http://www.trimble.com/positioning-services/> [Accessed 25 February 2013].

Tuchin, Y., Even-Tzur, G., Kagansky, L., Kozakov, M., Polyak, E., Salmon, E. & Steinberg, G. (2009), 'Re-measuring and Processing of the Israeli GNSS-Based 3-rd Level Geodetic Control Network', FIG Working Week 2009, Eilat, Israel, 3-8 May 2009.

Varidel, D. & Chapuis, L. (2002), 'Mesurer des millimètres avec GPS', revue scientifique de l'Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud, pp 23-28.

Wang, DB., Ling Fang, X., Bo Xing, Z. & Huang, J. (2012), 'The Establishment of Geodetic Datum in Jiaonan City', Applied Mechanics and Materials, vol.170-173, pp 2864-2869.

XYZ. (2013) 'Le RTS, un positionnement du point précis en temps réel par GNSS', XYZ, no.135, p9.

Zeggai, A., Medjahed, S., Ben Ahmed, S.A., Ghezali, B., Ait Ahmed Lamara, R., Ayoub, A. & Taibi, H. (2006), 'Détermination d'altitudes par GPS/Nivellement. Application : Régions d'Oran et de Constantine.' Bulletin des Sciences Géographiques, no.18, pp 21-25.

# SOMMAIRE DES ANNEXES

---

**Annexe 1 : Les mesures GNSS**

**Annexe 2 : Inventaire des repères de nivellement**

**Annexe 3 : Résultats de l'enquête**

**Annexe 4 : Changement de référentiel**

**Annexe 5 : Emprise du REN09**

**Annexe 6 : Arrêté sur les classes de précision**

**Annexe 7 : Résultats des tests GNSS**

**Annexe 8 : Mode d'emploi Trimble Business Center**

**Annexe 9 : Aspects administratifs**

# Annexe 1

## LES MESURES GNSS

### 1 Fonctionnement

De nombreux ouvrages, notamment [Duquenne et al, 2005b], décrivent le principe du GNSS et pourront être consultés pour plus d'informations.

Le système GPS voit le jour en 1973 aux États-Unis et avait pour principal utilisateur l'armée. Depuis, il s'est démocratisé et est utilisé mondialement dans de plus en plus de domaines.

Les anciens satellites peuvent émettre un signal sur deux ondes porteuses différentes qui permet de transmettre l'information:

- L1 avec une fréquence de 1575,42 Mhz et une longueur d'onde de 0.1903m.
- L2 avec une fréquence de 1 227,60 Mhz et une longueur d'onde de 0.2440 m.

Les utilisateurs civils ont accès seulement à un seul code sur L1, le code C/A. L'accès au code P sur L1 et L2 est accessible seulement aux personnes habilitées, c'est-à-dire l'armée.

La combinaison de ces fréquences peut selon [Tabti et al, 2010], " [...] se former par l'addition ou la soustraction de mesures sur deux ou trois fréquences, elle permet de :

- Créer une seule observation ; ou on rassemble toutes les trois observations de phase en une seule observation.
- Éliminer ou réduire les effets des erreurs dans l'équation de la combinaison linéaire de la double différence.
- Réduire la corrélation entre les observations dans le modèle mathématique.
- Réduire le nombre des inconnus ; notamment dans la recherche des ambiguïtés entières.
- Créer des fréquences dont les longueurs d'ondes sont relativement grandes et qui sont utiles pour la résolution des ambiguïtés.
- Créer des fréquences dont les longueurs d'ondes sont courtes et qui sont nécessaires pour avoir une haute précision."

La modernisation du GPS est en cour [Tabti et al, 2010], [Fosburgh & Peetz,2005] et [Kasser, 2013]. En effet, les nouveaux satellites mis en orbite diffusent de nouveaux signaux civils tels que L2C qui, "facilite les corrections ionosphérique, permet une acquisition plus rapide du signal, une fiabilité accrue et une plus grande plage de fonctionnement. Ce signal est disponible depuis 2005" [Kasser, 2013].

Une nouvelle onde porteuse appelée L5 est aussi disponible sur les satellites du Bloc II F, mis en circulation en mai 2010. Elle permet également l'amélioration de la correction ionosphérique, mais aussi l'augmentation de la réception en environnements défavorables.

Enfin, le signal L1C qui lui sera disponible dès 2014 avec le lancement des satellites du bloc GPS IIIA, permettra l'interopérabilité avec le système de navigation Galileo.

De nouvelles combinaisons seront donc possibles et pourront faciliter la détermination des ambiguïtés entières (L1+L5 ou L2+L5) ou bien réduire les effets atmosphériques (L2-L5).

## 2 Sources d'erreur

Jusqu'en 2000, la précision du GNSS était dégradée à travers la Selective Availability par les États-Unis, pour écarter toutes menaces pour la sûreté nationale de ce pays. Aujourd'hui, bien que ce facteur n'entre plus en compte sur la précision des résultats, d'autres sont encore présents.

### 2.1 Précision des orbites des satellites

Chaque satellite possède une horloge atomique très précise et suit une orbite déterminée. Cependant, de faibles dérives liées à ces deux caractéristiques sont possibles et engendrent des erreurs sur le récepteur. Pour corriger ces erreurs, le message de navigation émis par le satellite permet de déterminer sa position et sa vitesse à tout moment.

### 2.2 Réfraction atmosphérique

L'onde GNSS doit traverser diverses couches de l'atmosphère avant d'atteindre le capteur, les deux principales affectant le signal sont l'ionosphère et la troposphère.

L'ionosphère est une enveloppe non neutre chargée en ions, la densité de ces ions est inconnue et variable dans le temps, c'est un milieu dispersif. Cette charge entraîne donc une perturbation de la vitesse de l'onde électromagnétique, le temps mis par l'onde pour traverser cette couche est donc modifié d'une durée inconnue que l'on appelle délai ionosphérique. L'utilisation de récepteur bi-fréquence permet d'éliminer ce délai.

La troposphère est la couche la plus basse de l'atmosphère, elle s'élève entre 8 km aux pôles et 16 km au-dessus de l'Équateur. Contrairement à l'ionosphère, c'est un milieu non dispersif pour les ondes de fréquence inférieure à 30 GHz. La réfraction est donc indépendante de la fréquence ce qui ne permet pas aux combinaisons entre les porteuses L1 et L2 de s'en affranchir. Des modèles empiriques ont donc été créés pour pallier à ce délai [Fund, 2009].

### 2.3 Environnement

L'inconvénient principal du choix de l'emplacement d'un point à déterminer par GNSS, lié à l'environnement, est la présence ou non de masque. Un masque est un objet qui se trouve sur la trajectoire du signal GNSS et qui peut modifier la distance parcourue de l'onde, on parle alors de multi-trajet.

## **2.4 Biais instrumentaux**

Les biais instrumentaux sont liés à l'excentrement des centres des antennes par rapport à leurs centres géométriques. En effet, le lieu géométrique de la réception du signal est le centre électrique de l'antenne qui est différent du centre géométrique. Chaque antenne est calibrée et des fichiers sont disponibles afin d'évaluer ce biais.

## Annexe 2

# INVENTAIRE DES REPÈRES DE NIVELLEMENT

Un dénombrement des repères de nivellement de l'IGN sur Rennes Métropole hors Ville de Rennes a été réalisé grâce au géoportail.

| Nom des communes          | Nombre de repères considéré existant par l'IGN |            |
|---------------------------|------------------------------------------------|------------|
|                           | Bourg                                          | Campagne   |
| Acigné                    | 2                                              | 3          |
| Betton                    | 9                                              | 10         |
| Bourgbarré                | 2                                              | 9          |
| Brécé                     | 1                                              | 9          |
| Bruz                      | 6                                              | plus de 15 |
| Cesson-Sévigné            | 5                                              | 11         |
| Chantepie                 | 3                                              | 2          |
| Chartres-de-Bretagne      | 4                                              | 2          |
| Chavagne                  | 4                                              | 0          |
| Chevaigné                 | 5                                              | 9          |
| Cintré                    | 3                                              | 5          |
| Clayes                    | 2                                              | 1          |
| Corps-Nuds                | 3                                              | 10         |
| Gévezé                    | 2                                              | 6          |
| Laillé                    | 4                                              | 5          |
| La Chapelle-des-Fougeretz | 6                                              | 1          |
| La Chapelle-Thouarault    | 1                                              | 6          |
| Le Rheu                   | 0                                              | 8          |
| Le Verger                 | 4                                              | 4          |
| L'Hermitage               | 5                                              | 3          |
| Montgermont               | 1                                              | 2          |

| Nom des communes           | Nombre de repères considéré existant par l'IGN |          |
|----------------------------|------------------------------------------------|----------|
|                            | Bourg                                          | Campagne |
| Mordelles                  | 3                                              | 3        |
| Nouvoitou                  | 3                                              | 10       |
| Noyal-Châtillon-sur-Seiche | 5                                              | 4        |
| Orgères                    | 2                                              | 0        |
| Pacé                       | 5                                              | 7        |
| Parthenay-de-Bretagne      | 3                                              | 0        |
| Pont-Péan                  | 1                                              | 5        |
| Saint-Armel                | 3                                              | 2        |
| Saint-Erblon               | 1                                              | 3        |
| Saint-Gilles               | 3                                              | 7        |
| Saint-Grégoire             | 5                                              | 12       |
| Saint-Jacques-de-la-Lande  | 7                                              | 5        |
| Saint-Sulpice-la-Forêt     | 3                                              | 4        |
| Thorigné-Fouillard         | 7                                              | 2        |
| Vern-sur-Seiche            | 5                                              | 5        |
| Vezin-le-Coquet            | 2                                              | 8        |
| Romillé                    | 3                                              | 6        |
| la Chapelle-Chaussée       | 3                                              | 1        |
| Miniac-sous-Bécherel       | 0                                              | 3        |
| Langan                     | 1                                              | 1        |
| Bécherel                   | 4                                              | 0        |

## **Annexe 3**

# **RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE**



Dix-neuf collectivités ont été contactées pour répondre à un questionnaire portant sur leur canevas, les transports en commun guidés ainsi que sur le contrôle altimétrique. Douze ont répondu à cette enquête. L'ensemble des réponses est présenté dans cette annexe.

| Ville                              | Présence d'un canevas       | Système de coordonnées | Densité des stations                                                      | Densité des repères de nivellement                                               | Classe de précision du canevas |                                                        | Moyen de mise en place du canevas                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    |                             |                        |                                                                           |                                                                                  | Planimétrique                  | Altimétrique                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Marseille<br>Provence<br>Métropole | Non                         |                        |                                                                           |                                                                                  |                                |                                                        | Ils réalisent tous les rattachements par temps réel Teria.<br>Pour le moment aucun point n'est stocké.<br>Ils réfléchissent à la réalisation de fiche signalétique sur ces points.                                                                                                                                                 |
| Ville<br>d'Orléans                 | Ville                       |                        | Canevas primaire et densification lors des levés                          | Ceux de l'IGN                                                                    | 2 cm                           | 1 cm                                                   | Déterminer par les prestataires pour respecter les classes de précision du CCTP                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Reims<br>Métropole                 | Ensemble de l'agglomération | Lambert 93             | 150 points sur 87 km <sup>2</sup> distance entre points de plus de 500m   | Le canevas ne contient pas de repère de nivellement                              | 2 cm                           | 3 cm                                                   | Par GPS en 1997                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Nantes<br>Métropole                | Ensemble de l'agglomération |                        | Implantation de base qui comprend 2 stations, distance entre base de 800m | Ville de Nantes 1 point tous les 400m et sur la CU à terme 1 point tous les 800m | 4 cm                           | 2 cm                                                   | Les Bases: statique GNSS avec contrôle de la distance au tachéomètre entre les stations, nivellement direct entre les stations et rattachement aux repères de nivellement.<br>L'écart entre le nivellement direct et GNSS est compensé suivant des critères internes.<br>Les polygonales: tachéomètre et contrôle GNSS temps réel. |
| Metz<br>Métropole                  | Ville                       | CC49                   | 1000 points pour 42km <sup>2</sup>                                        | 700 points pour 42 km <sup>2</sup>                                               | 1 cm                           | 0,1 cm                                                 | Tachéomètre ou post traitement pour les stations<br>Nivellement direct pour les repères de nivellement                                                                                                                                                                                                                             |
| Ville de Tours                     | Ville                       |                        | 1 point tous les 200 à 500 m                                              | 1 point tous les 200 à 500 m                                                     | 1,2 cm                         | Celle d'un nivellement direct avec double retournement | Réalisé en 1992 : plusieurs points de charpente en GPS, puis des cheminements polygonaux au tachéomètre pour la planimétrie et nivellement direct pour l'altimétrie.<br>Pour finir, un calcul en bloc a été effectué.                                                                                                              |

| Ville                          | Présence d'un canevas       | Système de coordonnées | Densité des stations                                                                                                                                                                                            | Densité des repères de nivellement                                                                                                | Classe de précision du canevas                                                     |                                                                                  | Moyen de mise en place du canevas                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                |                             |                        |                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                   | Planimétrique                                                                      | Altimétrique                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Toulouse Métropole             | Ville                       |                        | 1 point tous les 500 m environ                                                                                                                                                                                  | Ceux de l'IGN                                                                                                                     | Estimation 2-3 cm                                                                  | Estimation 2-3 cm                                                                | Majoritairement avec des moyens traditionnels, mais aujourd'hui compléments dans les zones où les points ont disparu par un relevé GNSS statique 10 min, post-traité sur deux stations RGP (ligne de base max 10 km sur la CU, 3 km sur la ville centre).                                                                     |
| Grenoble                       | Ensemble de l'agglomération | CC45                   | Ville de Grenoble: 1 point tous les 100m<br>Agglomération: 3 points par commune                                                                                                                                 | Ville de Grenoble: 80 points<br>Agglomération: 3 points par commune                                                               | 5 cm pour la Ville et 2 cm pour l'agglomération                                    | 2 cm pour la Ville et 1 cm pour l'agglomération                                  | Pour la ville centre : Nivellement Direct pour l'altimétrie. GNSS complété par des polygonations au théodolite pour la planimétrie. Pour l'agglomération: GPS pour le XYZ (utilisation de 3 GPS en parallèle lors de la création du canevas intercommunal afin de garantir les classes de précision)                          |
| Métropole Nice Côte d'Azur     | Ensemble de l'agglomération |                        | 20 000 points                                                                                                                                                                                                   | 700 repères de nivellement                                                                                                        | Dépend du mode opératoire et des points d'appui. Valeur affectée à chaque station. | Dépend du mode opératoire et des points d'appui. Valeur affectée à chaque repère | Moyens traditionnels (tachéomètre et nivellement direct) ainsi que GNSS                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Ville de Mulhouse              | Ensemble de l'agglomération | Lambert II zone        | 249 stations / km <sup>2</sup> en moyenne                                                                                                                                                                       | 27.4 repères / km <sup>2</sup> en moyenne                                                                                         | Classe de précision interne de 2cm sur un même quartier                            | Emq comprise entre 1.3 et 2 mm dans les calculs du réseaux                       | Moyens traditionnels uniquement (tachéomètre et nivellement direct)                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Communauté urbaine de Bordeaux | Ensemble de l'agglomération | CC45                   | Superficie de l'agglomération de 577 km <sup>2</sup> dont ≈ 200 km <sup>2</sup> d'urbain et semi-urbain<br>Aujourd'hui densification de l'urbain et semi-urbain avec 0,5 point par km<br>A terme 1 point par km | Aujourd'hui 0.4 repère /km sur l'ensemble du territoire communautaire<br>(En urbain 2 repères/km et en semi-urbain 1.5 repère/km) | N'applique pas les classes de précision mais l'arrêté de 1980                      | N'applique pas les classes de précision mais l'arrêté de 1980                    | Les points d'appui sont déterminés par GPS post traitement (deux sessions de 30min à 2h40). Si écart planimétrique < 1 cm alors moyenne arithmétique, si écart planimétrique > 1cm réalisation d'une 3ème détermination. Ces points sont reliés par cheminement polygonal en centrage forcé. Altimétrie en nivellement direct |
| Grand Lyon                     | Ensemble de l'agglomération | CC46                   | Environ 8000 points                                                                                                                                                                                             | Environ 8000 points                                                                                                               | De 1 à 4 cm selon leur ordre                                                       | 1cm                                                                              | Relèvement pour la planimétrie<br>Nivellement direct pour l'altimétrie<br>GNSS si les méthodes précédentes ne peuvent être mise en place                                                                                                                                                                                      |

| Ville                                | Contrôle de l'altimétrie des prestations                                                    |                                      | Techniques employées                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      | Sommets du canevas                                                                          | Points de détail                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Marseille<br>Provence<br>Métropole   | Précision absolue                                                                           | Précision absolue                    | Contrôle de 80 % des plans reçus par échantillonnage sur le terrain. Relevé par système Téria.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Ville d'Orléans                      | Précision absolue et relative                                                               | Précision absolue et relative        | Relève de la responsabilité du prestataire qui doit respecter les classes de précision du CCTP.<br>(Raccords entre les levés et levés complémentaire en cas de doute)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Reims<br>Métropole                   | Pas de contrôle                                                                             | Pas de contrôle                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Nantes<br>Métropole                  | Précision absolue                                                                           | Précision relative                   | Le Canevas: GNSS temps réel pour un premier sondage. Si écart, reprise en nivellement direct par le prestataire ou en régie.<br>Les points de détail: contrôle de la cohérence par des "points doubles". Les écarts importants sont recherchés par GNSS temps réel.                                                                                                                                                                                                                   |
| Metz Métropole                       | Précision absolue                                                                           | Précision absolue                    | Nivellement indirect au tachéomètre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Ville de Tours                       | Pas de contrôle                                                                             | Pas de contrôle                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Toulouse<br>Métropole                | Pas de contrôle                                                                             | Pas de contrôle                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Grenoble                             | Précision absolue                                                                           | Pas de contrôle                      | Nivellement direct depuis les repères de nivellement                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Métropole Nice<br>Côte d'Azur        | Précision absolue<br>Contrôle<br>systématique de<br>tous les chantiers<br>avec polygonation | Précision absolue                    | Contrôle de tous les points de polygonation.<br>GNSS avec coefficient de sécurité égal à 1 si contrôle terrain.<br>Sinon recalcul et vérification par rapport aux points d'appuis déjà connus au bureau                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Ville de<br>Mulhouse                 | Pas de contrôle                                                                             | Précision relative<br>(leur canevas) | Nivellement direct de manière à avoir des mesures de contrôle plus précises que celles du levé du prestataire.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Communauté<br>urbaine de<br>Bordeaux | Précision absolue                                                                           | Précision absolue                    | Nivellement direct                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Grand Lyon                           | Pas de contrôle                                                                             | Contrôle mais pas<br>sur le terrain  | Un contrôle de l'altimétrie au moyen de vue perpendiculaire à l'axe de la chaussée est réalisé ce qui donne un fuseau de points sur lequel est réalisé une polygône 3D passant par tous les points qui s'écartent de ce fuseau. Ensuite, contrôle tous les points des sommets de la polygône précédemment dessinée en vue en plan.<br>(Fonctionne assez bien dans le cas d'un lever de voirie. Plus difficile par contre dans le cas d'un lever surfacique type place ou zone verte). |

| Ville                        | Altération linéaire  | Transport en commun guidé |         |                  | Précisions du canevas pour le transport en commun guidé |                                    | Système de coordonnées local |               |                                                                                                                     | Transformation dans le système réglementaire de ce système  |
|------------------------------|----------------------|---------------------------|---------|------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                              |                      | Méto                      | Tramway | Surface/Sous-Sol | Planimétrique                                           | Altimétrique                       | Ville                        | Agglomération | Si oui pourquoi?                                                                                                    |                                                             |
| Marseille Provence Métropole | -70mm/km pour CC43   | Oui                       | Oui     | Les deux         | En relatif 0.5 cm<br>En absolue < 1cm                   | En absolue < 1cm                   | Le long du tracé             | Non           | A cause de l'altération mais surtout pour avoir une meilleure précision                                             | En L3 jusqu'à présent, réflexion pour passer en RGF 93 CC44 |
| Ville d'Orléans              | -85mm/km pour CC48   | Non                       | Oui     | Surface          | Pas de leurs compétences                                | Pas de leurs compétences           | Oui                          | ?             | C'est la coutume de privilégier la précision relative tout en conservant un rattachement secondaire à une référence | Pas de transformation                                       |
| Reims Métropole              | -75mm/km pour CC49   | Non                       | Oui     | Surface          | Pas de leurs compétences                                | Pas de leurs compétences           | Non                          | Non           |                                                                                                                     |                                                             |
| Nantes Métropole             | -80mm/km pour CC47   | Non                       | Oui     | Surface          | Précision centimétrique en relatif                      | Précision centimétrique en relatif | Non                          | Non           |                                                                                                                     |                                                             |
| Metz Métropole               | -80 mm/km pour CC 49 | Non                       | Oui     | Surface          | ?                                                       | ?                                  | Le long du tracé             | Non           | Pour une homogénéisation sur le tracé                                                                               | Pas de transformation                                       |
| Ville de Tours               | -60 mm/km pour CC47  | Non                       | Oui     | Surface          | Précision interne de 1 cm                               | Précision interne de 1 cm          | Non                          | Non           |                                                                                                                     |                                                             |

| Ville                          | Altération linéaire                        | Transport en commun guidé |         |                  | Précisions du canevas pour le transport en commun guidé                            |                                                                         | Système de coordonnées local |               |                                             | Transformation dans le système réglementaire de ce système |
|--------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|---------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                |                                            | Méto                      | Tramway | Surface/Sous-Sol | Planimétrique                                                                      | Altimétrique                                                            | Ville                        | Agglomération | Si oui pourquoi?                            |                                                            |
| Toulouse Métropole             | -31 mm/km pour CC43                        | Oui                       | Oui     | Les deux         | ?                                                                                  | ?                                                                       | Non                          | Non           |                                             |                                                            |
| Grenoble                       | -80 mm/km pour CC45                        | Non                       | Oui     | Surface          | Précision totale 1.5 cm précision interne 1cm                                      | Précision totale difficile à quantifier précision interne 3 mm          | Non                          | Non           | Non car l'altération linéaire est maîtrisée |                                                            |
| Métropole Nice Côte d'Azur     | -75mm/km pour CC44                         | Non                       | Oui     | Les deux         | Précision interne de 1,5cm Précision totale 2,5cm                                  | Précision interne de 1 cm Précision totale 2cm                          | Non                          | Non           | Non car l'altération linéaire est maîtrisée |                                                            |
| Ville de Mulhouse              | -80 mm/km pour CC48                        | Non                       | Oui     | Surface          | Précision relative emq ≤ 0.3 cm                                                    | Précision relative emq ≤ 2 mm                                           | Non                          | Non           |                                             |                                                            |
| Communauté urbaine de Bordeaux | Entre -73.7 mm/km et -85.3 mm/km pour CC45 | Non                       | Oui     | Surface          | Pas de classe de précision Entre 2 points consécutifs: distance ±2mm angle ±0.0020 | Pas de classe de précision Entre 2 points consécutifs: altimétrie ± 1mm | Non                          | Non           |                                             |                                                            |
| Grand Lyon                     | -80 mm pour CC46                           | Oui                       | Oui     | Les deux         | Pas de leurs compétences                                                           | Pas de leurs compétences                                                | Non                          | Non           |                                             |                                                            |

## Annexe 4

# CHANGEMENT DE RÉFÉRENTIEL

Ce document a été réalisé par Antoine Guillot lors de son projet de fin d'études de l'ESGT. Son sujet portait sur le changement de référentiels géographiques à la Ville de Rennes. Il a été réalisé au sein du service SIG en 2008. Ce document présente le protocole à mettre en place pour réaliser les changements de coordonnées sous Autocad.

- 1) Ouvrir un document vierge
- 2) Mettre l'unité du dessin courant en mètre.

Aller dans Format et sélectionnez Contrôle des unités puis sélectionner "Mètres"

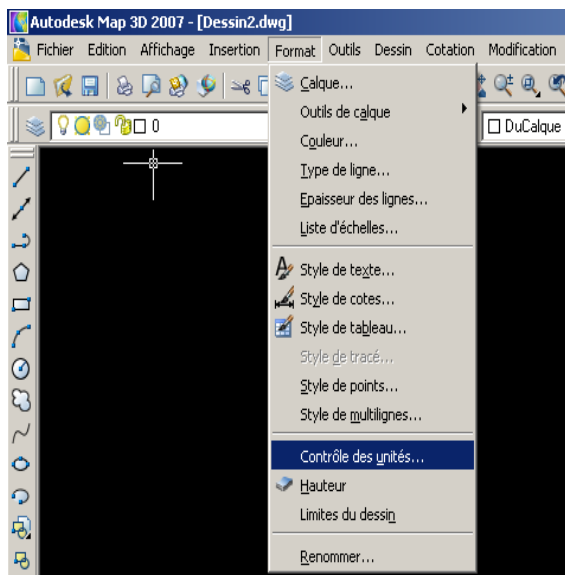


Figure 40 : Le contrôle des unités.

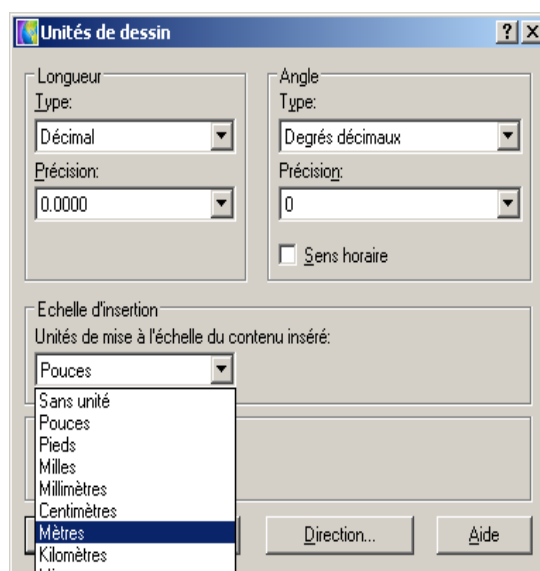


Figure 41 : Le choix du mètre.

- 3) Choisir le système de coordonnées du dessin courant (Système dans lequel vous voulez transformer vos données)

Cette partie est expliquée dans le document sur l'attribution des systèmes de coordonnées dans Autocad Map 3D. Les figures 3 et 4 en sont le résumé.

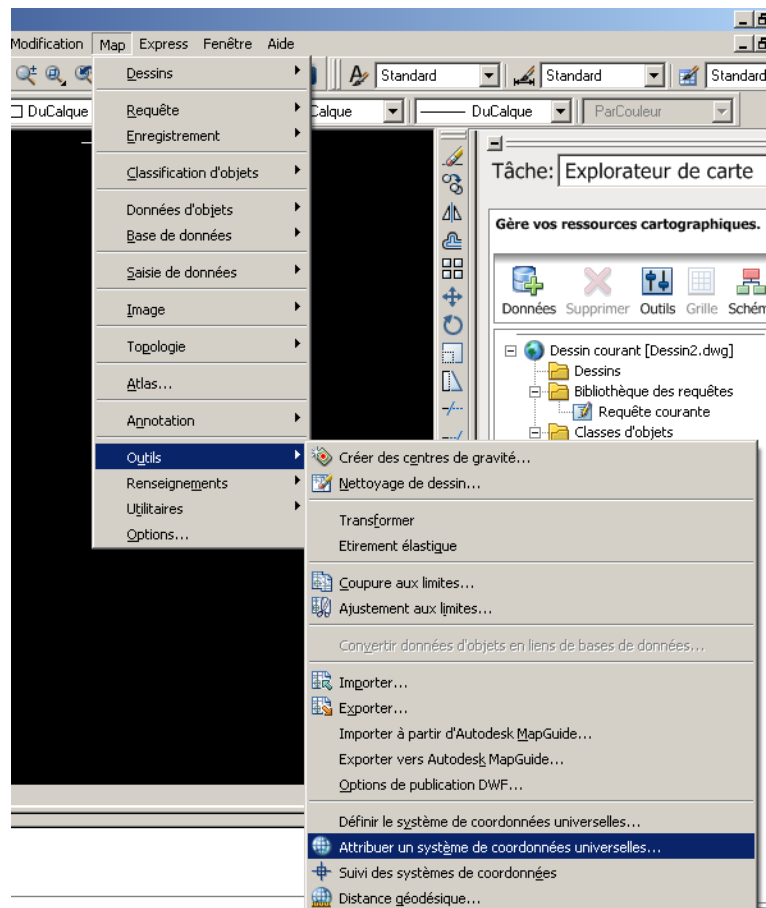


Figure 42 : Outil pour attribuer un système de coordonnées.

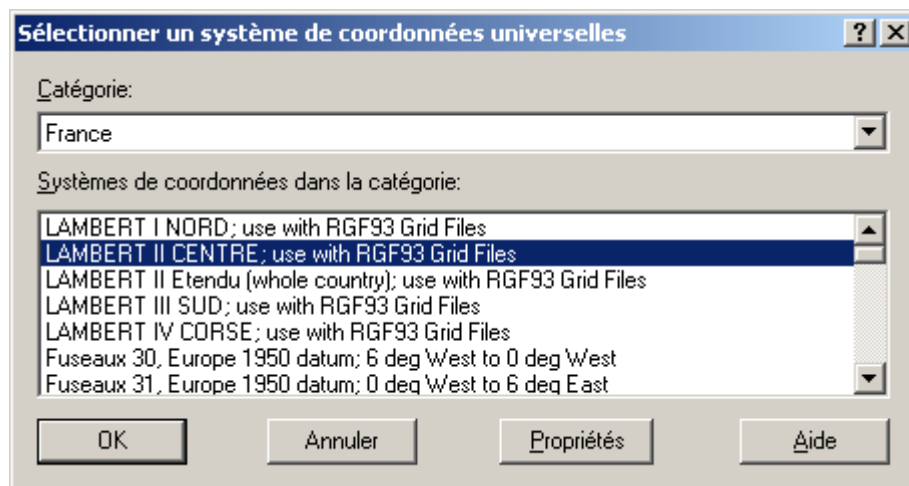


Figure 43 : La liste des systèmes de coordonnées.

4) Associer votre DWG ou votre DXF en dessin source

Cette partie est expliquée dans le document sur l'attribution des systèmes de coordonnées dans Autocad Map 3D. Les figures 5, 6 et 7 en sont le résumé.

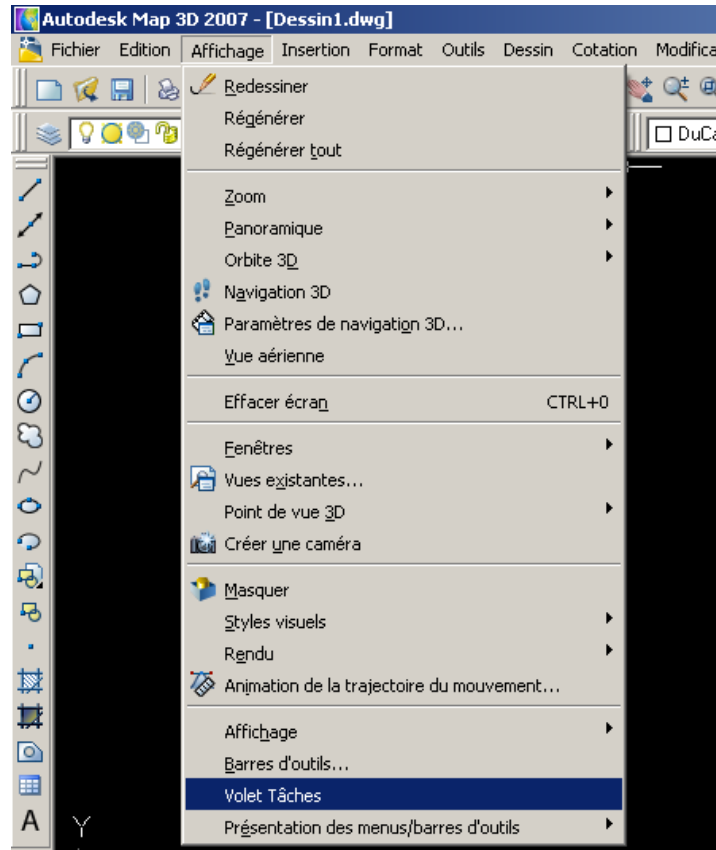


Figure 44 : Affichage du Volet Taches.

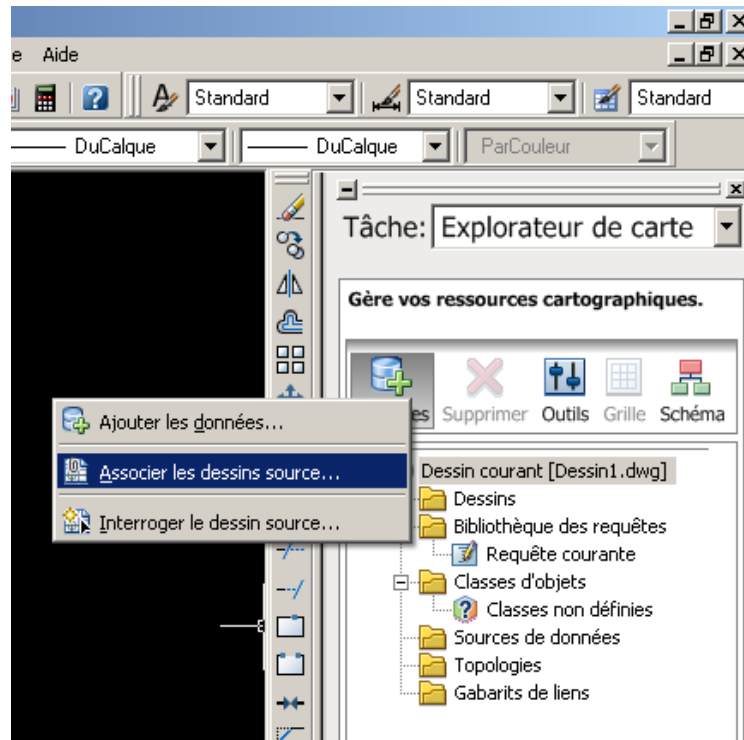


Figure 45 : Association des dessins source dans l'Explorateur de carte.

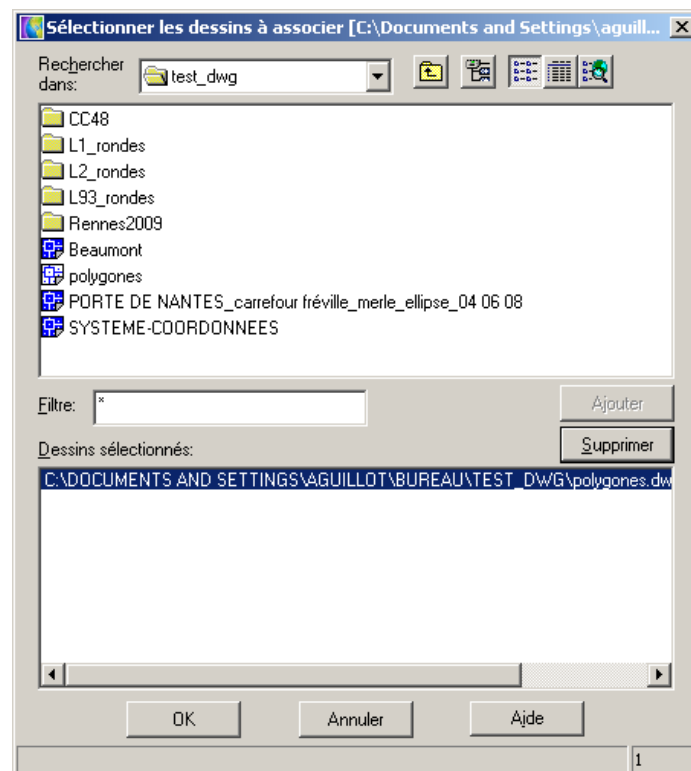


Figure 46 : Sélection du dessin à associer.

5) Attribuer un système de coordonnées au dessin source

Cette étape est la même que l'étape 4, mais le système de coordonnées est attribué au dessin source (figure 8).

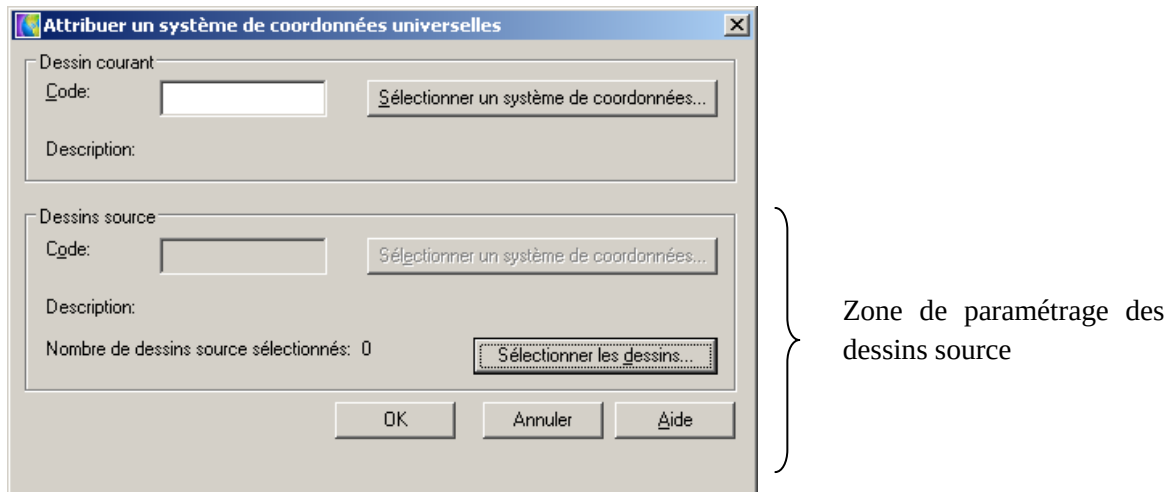


Figure 47 : Attribution d'un système de coordonnées au dessin source.

6) Lancer une requête pour afficher le dessin source dans le système de coordonnées du dessin courant

Pour cela il faut définir une requête à partir de "Requête courante" dans l'Explorateur de carte (figure 9).

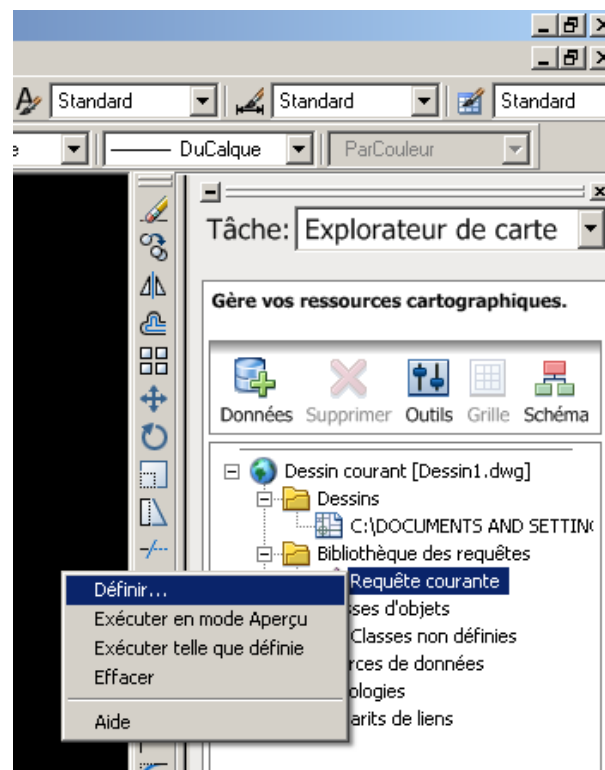


Figure 48 : Outil de définition d'une requête.

Une fenêtre de paramètres apparaît, il faut cliquer sur "Emplacement" dans la partie gauche.

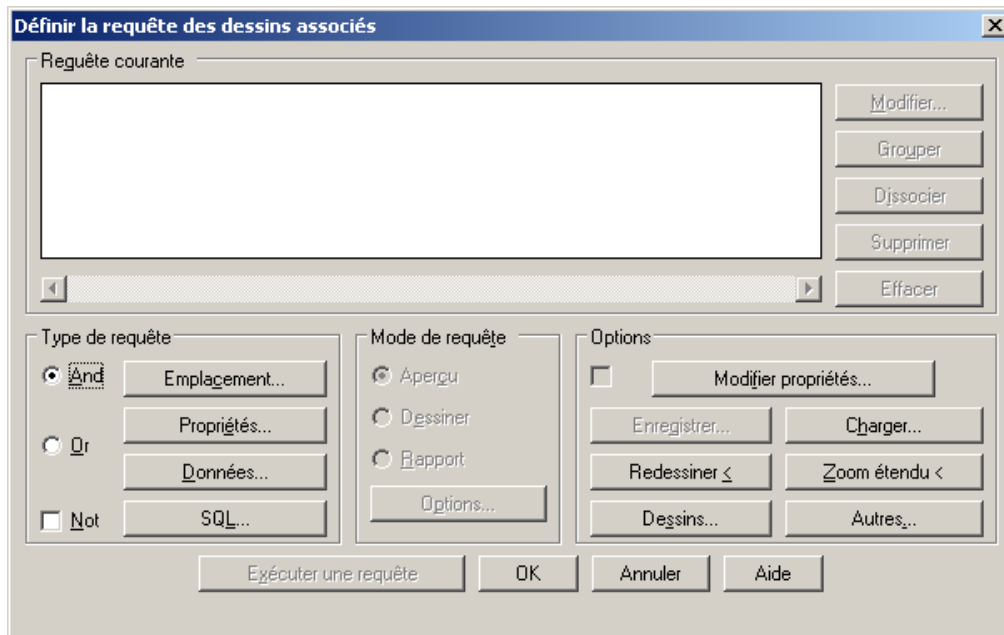


Figure 49 : Paramètres de la requête.

Dans la fenêtre des paramètres de l'emplacement, il faut sélectionner "Tout" dans le type de limite et cliquer sur "OK".

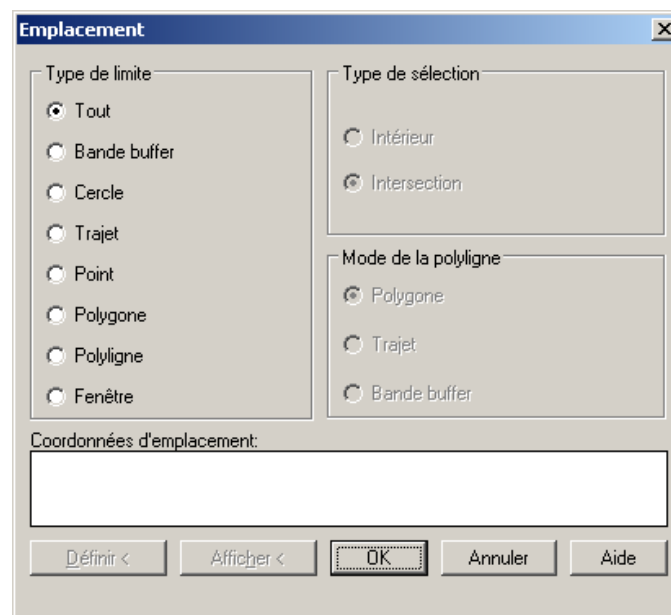


Figure 50 : Paramètres d'Emplacement.

Sélectionner "Dessiner" dans "Mode de requête", en bas au centre de la fenêtre.

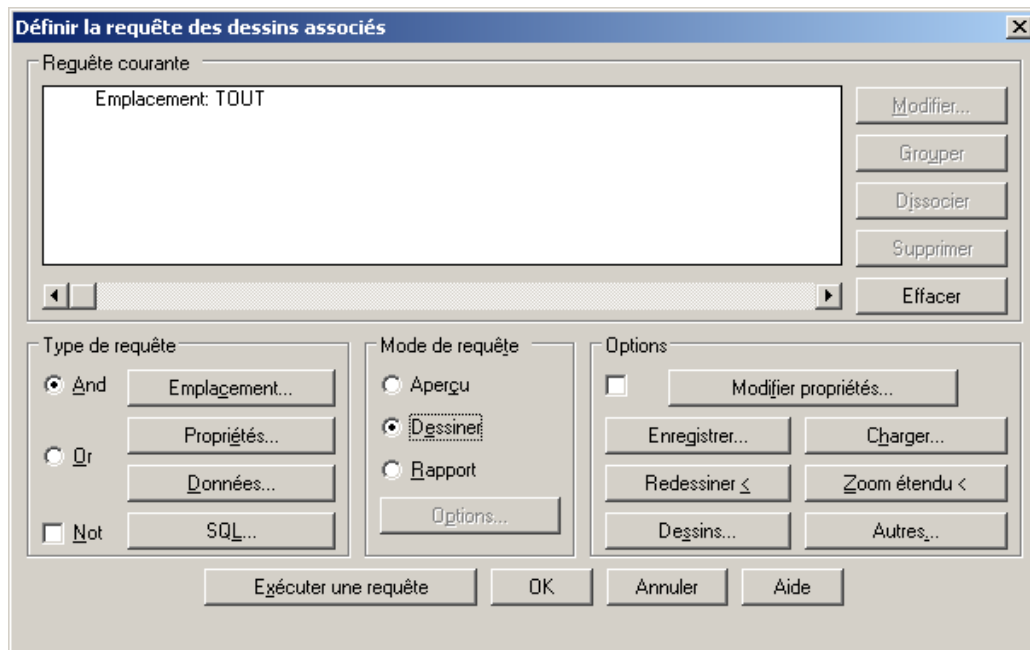


Figure 51 : Modification du mode de requête.

Cliquer ensuite sur Exécuter une requête. Le dessin source est maintenant dans votre espace objet.

7) Visualiser le dessin dans l'espace objet

Pour mettre à jour l'affichage et se repositionner sur le dessin, il faut utiliser un zoom étendu dans le menu "Affichage" (Figure 13).

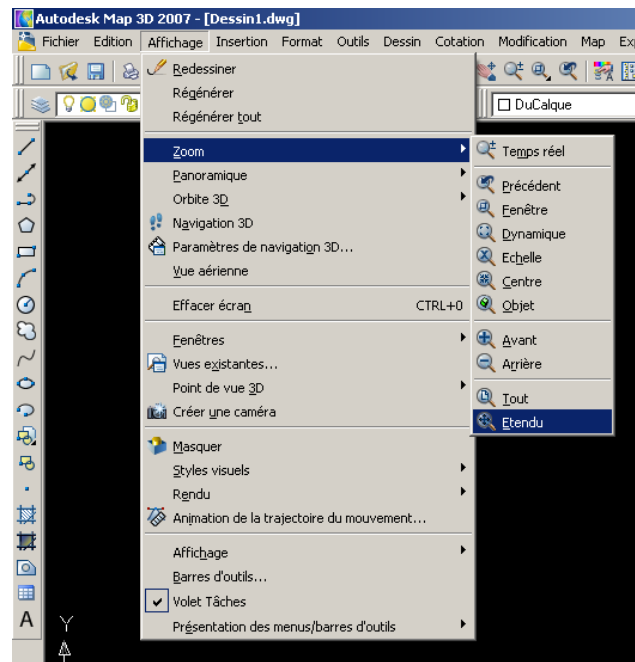


Figure 52 : Sélection du zoom étendu.

## 8) Dissocier le dessin source

Vous avez maintenant en dessin courant votre dessin d'origine, mais dans le bon système de coordonnées. Il suffit maintenant de dissocier le dessin source et d'enregistrer. Pour dissocier un dessin associé, il suffit de faire un clic droit sur le chemin du fichier dans l'Explorateur de carte, "Dessins".

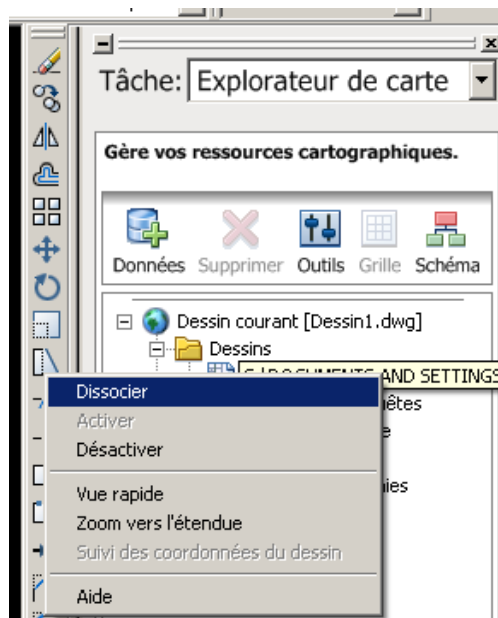


Figure 53 : Dissocier un dessin associé.

## 9) Enregistrer

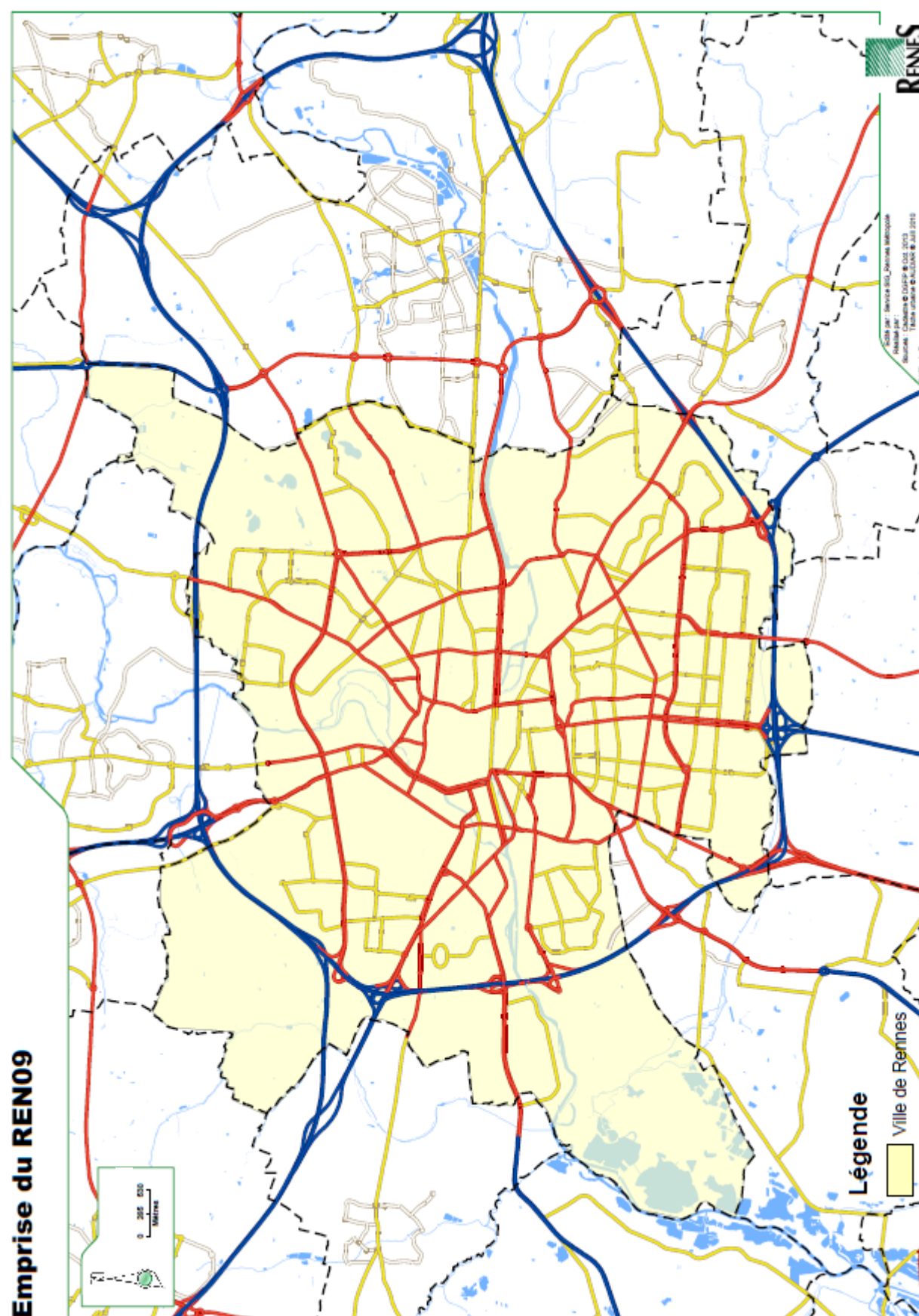
Il ne reste plus qu'à enregistrer le dessin par le menu "Fichier", "Enregistrer sous"

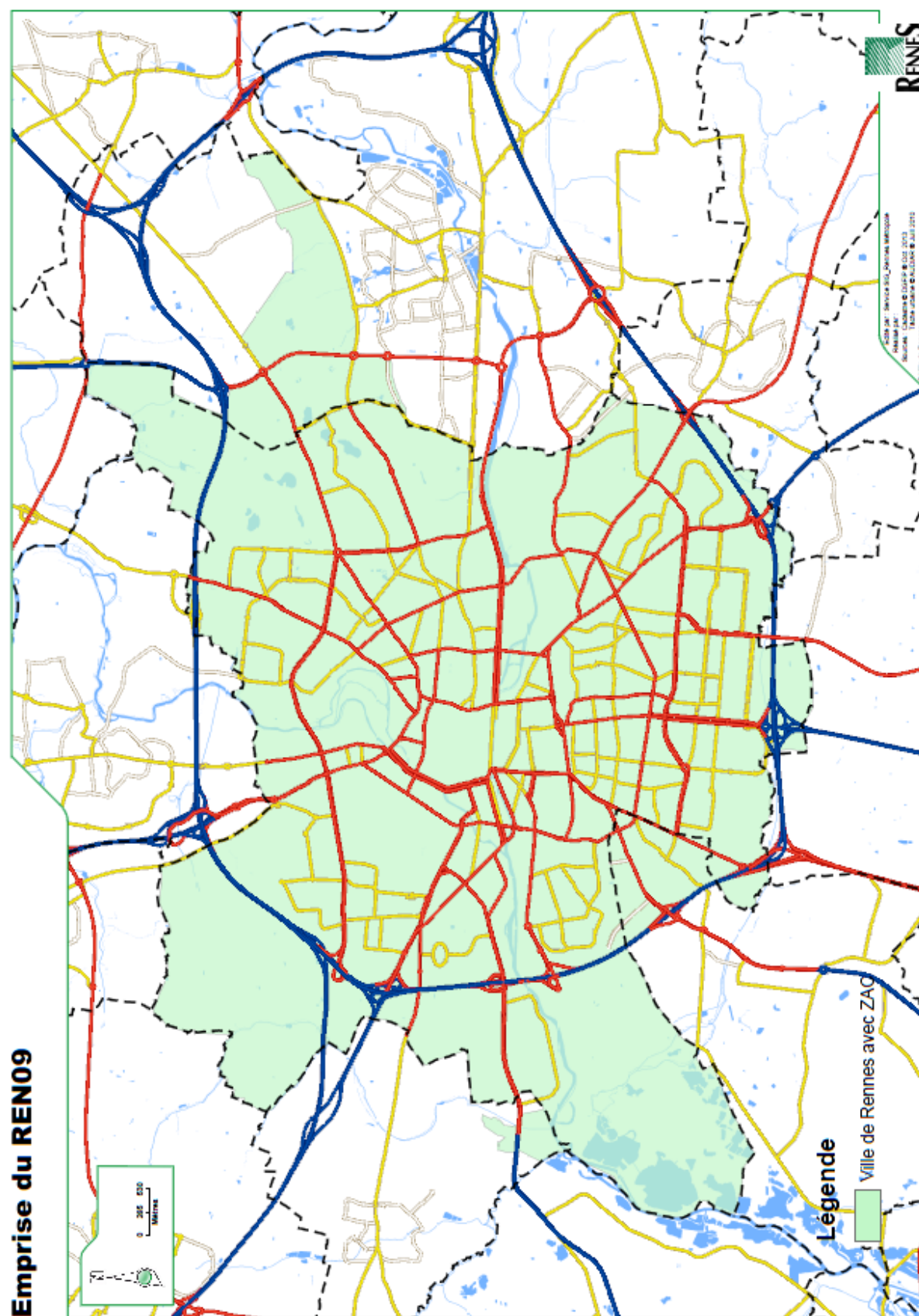
## **Annexe 5**

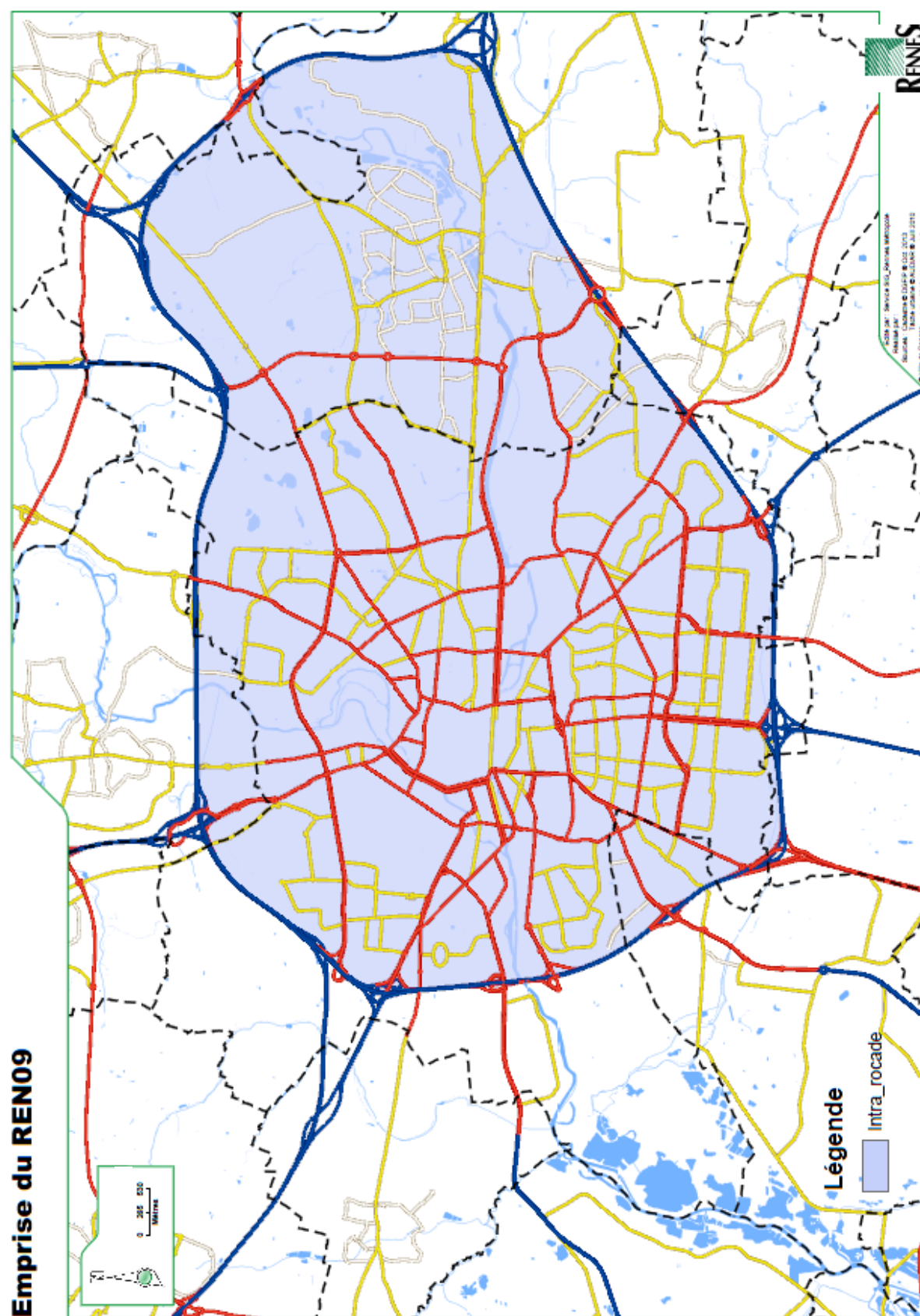
### **EMPRISE DU REN09**

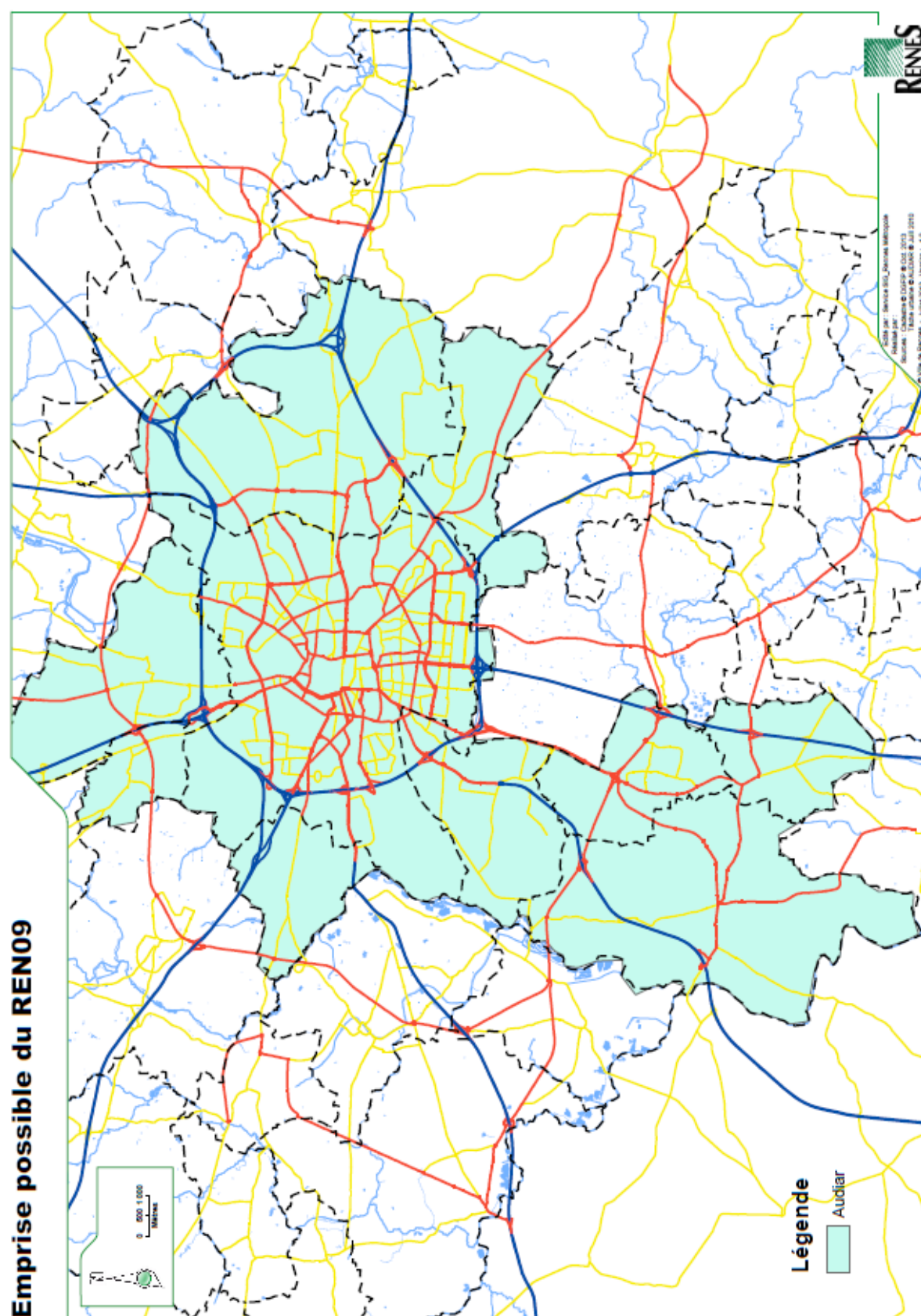


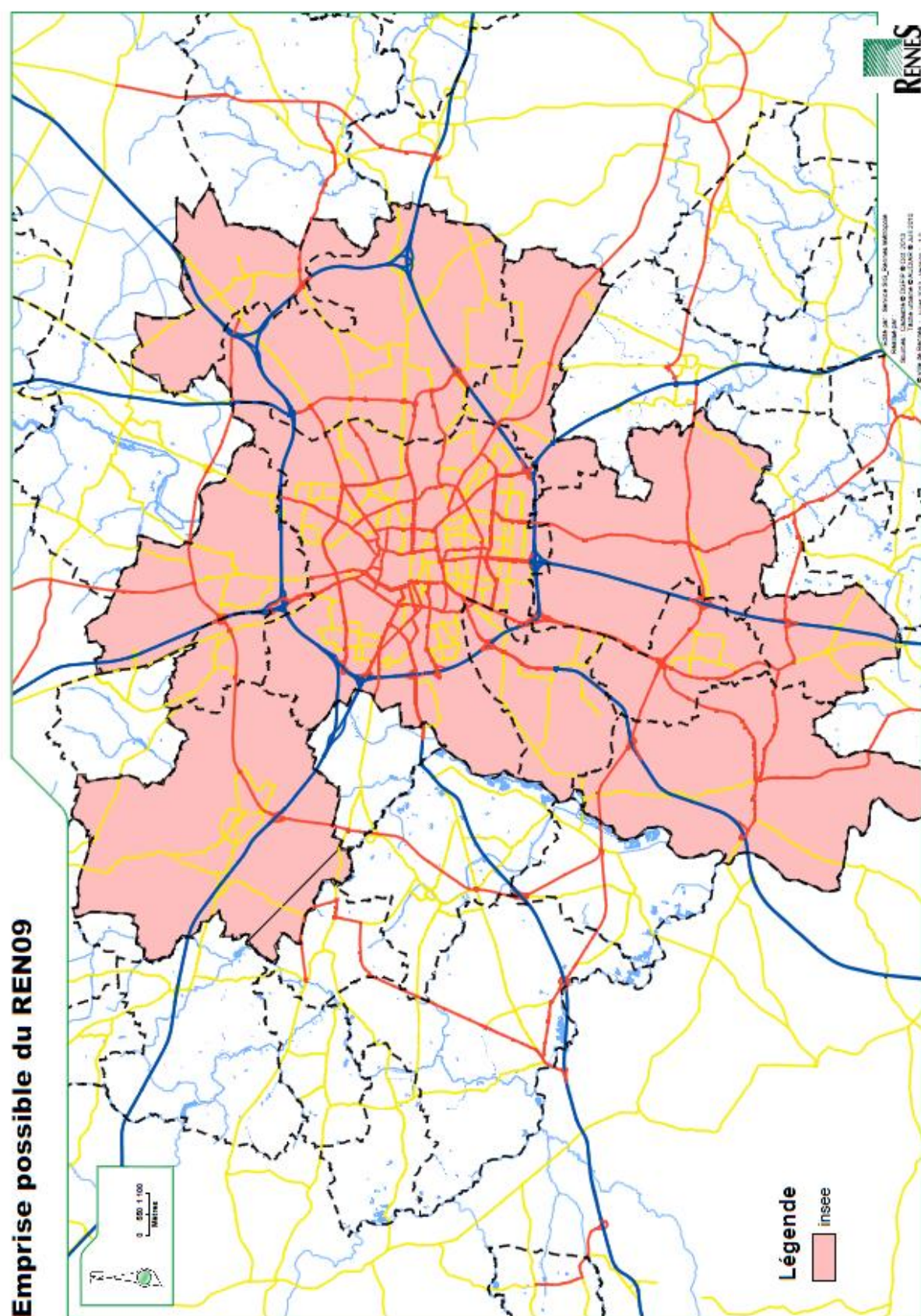
Cette annexe représente l'ensemble des solutions qui ont été envisagées pour l'emprise du REN09











## Annexe 6

# ARRÊTÉ SUR LES CLASSES DE PRÉCISION

JORF n°252 du 30 octobre 2003 page 18546  
texte n° 21

ARRETE

**Arrêté du 16 septembre 2003 portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'État, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte**

NOR: EQUI0300864A

Le ministre de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer,  
Vu le décret n° 92-706 du 21 juillet 1992 modifiant le décret n° 85-790 du 26 juillet 1985 relatif au rôle et à la composition du Conseil national de l'information géographique ;  
Vu la loi n° 95-115 du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire, modifiée par la loi n° 99-533 du 25 juin 1999 d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire, notamment son article 89 ;  
Vu le décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics ;  
Vu l'arrêté du 20 mai 1948 fixant les conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics ;  
Vu l'arrêté du 21 janvier 1980 fixant les tolérances applicables aux levés à grande échelle entrepris par les services publics ;  
Vu l'avis du Conseil national de l'information géographique dans sa séance du 13 novembre 2002,  
Arrête :

### Article 1

Tous les travaux topographiques réalisés par l'État, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte doivent être spécifiés et évalués selon les modalités définies dans le présent arrêté, à l'exception des levés hydrographiques.

### I. - Spécifications et classes de précision

#### Article 2

Les écarts déterminés lors des contrôles des levés topographiques permettent de vérifier le respect de la classe de précision de ceux-ci. Lors de levés d'objets géographiques, les mesures d'écarts s'appliquent sur des points caractéristiques des objets levés, bien identifiés et ne présentant aucun caractère d'ambiguïté. Ces points sont comparés aux points correspondants du terrain nominal. La précision d'un levé d'objets géographiques peut être spécifiée soit par un gabarit d'erreurs spécifique, soit par un modèle standard.

## Article 3

La position des points est définie par 1, 2 ou 3 coordonnées, et parmi celles-ci on ne comptabilise ensemble que celles qui suivent un même modèle statistique, selon la nature des levés (un levé altimétrique concerne une coordonnée, un levé planimétrique, deux, un levé tridimensionnel isotrope, trois, mais un levé tridimensionnel dont le modèle statistique planimétrique est différent du modèle statistique altimétrique fera l'objet de traitements séparés pour les deux coordonnées planimétriques et pour la coordonnée altimétrique). L'écart en position Epos pour un point donné, par rapport à sa position issue d'un contrôle, est défini par la distance euclidienne, c'est-à-dire la racine carrée de la somme des carrés des écarts sur chacune des coordonnées soumise à la même classe de précision. Une mesure n'est considérée comme mesure de contrôle que lorsque sont mis en oeuvre des procédés fournissant une précision meilleure que celle de la classe de précision recherchée, avec un coefficient de sécurité C au moins égal à 2. C'est le rapport entre la classe de précision des points à contrôler et celle des déterminations de contrôle, classe de précision qui est elle-même évaluée selon les règles de l'art. La taille et la composition de l'échantillon d'objets géographiques de contrôle sont précisées par contrat.

## Article 4

Un gabarit d'erreurs est déterminé par une courbe, un histogramme ou une table de valeurs, précisant pour chaque catégorie d'objets géographiques, et pour chaque classe de valeurs d'écarts, le nombre toléré d'écarts dépassant le seuil correspondant.

Pour chaque catégorie d'objets géographiques, on spécifiera le pourcentage d'écarts pouvant dépasser un premier seuil donné, puis le pourcentage de ceux pouvant dépasser un second seuil donné, etc., et ceci pour autant de seuils que souhaité. On pourra en particulier, si besoin est, spécifier un seuil qu'aucun écart ne devra dépasser. La taille et la composition du gabarit d'erreurs sont précisées par contrat.

## Article 5

Pour tout échantillon comportant N objets géographiques, on calcule l'écart moyen en position Emoy pos. Celui-ci est défini par la moyenne arithmétique des écarts en position Epos relevés sur les points des objets géographiques. On dit que la population dont est issu l'échantillon comportant N objets est de classe de précision [xx] cm lorsque simultanément les trois conditions a, b, et c, sont remplies :

a) L'écart moyen en position Emoy pos de l'échantillon est inférieur à

$$[xx] \times \left(1 + \frac{1}{2 \times C^2}\right) \text{ cm}$$

(C étant le coefficient de sécurité des mesures de contrôle),

b) Le nombre N d'écarts dépassant le premier seuil

$$T = k \times [xx] \times \left(1 + \frac{1}{2 \times C^2}\right)$$

n'excède pas l'entier immédiatement supérieur à  $0,01 \times N + 0,232 \times EN$

(où k prend les valeurs indiquées dans la table 1 en fonction du nombre n de coordonnées caractérisant la position des objets géographiques et suivant la même loi statistique).

Table 1 : valeurs du coefficient k en fonction du nombre n de coordonnées caractérisant la position des objets géographiques considérés et suivant la même loi statistique.

Vous pouvez consulter le tableau dans le JO  
n° 252 du 30/10/2003 page 18546 à 18548

Lorsque  $N < 5$ , aucun écart supérieur à  $T$  n'est admis (cf. table 2).

Table 2 : exemples de nombre  $N'$  maximaux d'écarts dépassant le premier seuil  $T$  acceptés pour un échantillon de  $N$  éléments.

Vous pouvez consulter le tableau dans le JO  
n° 252 du 30/10/2003 page 18546 à 18548

c) Aucun écart en position dans l'échantillon n'excède le second seuil

$$T = 1.5 \times k \times [xx] \times \left( \frac{1}{1 \times 2C^2} \right)$$

## II. - Catégories de travaux topographiques

### Article 6

Les points de canevas sont déterminés par 1, 2 ou 3 coordonnées.

Les écarts observés sur les canevas sont issus de trois origines : les erreurs internes, les erreurs de rattachement et les erreurs propres du réseau légal de référence. Ces erreurs peuvent parfois être individualisées, en particulier lorsque les mesures présentent une surabondance suffisante. On désigne par surabondance d'un canevas le taux formé par le rapport du nombre de mesures indépendantes observées sur un canevas au nombre minimal de mesures permettant de déterminer celui-ci. Les classes de précision totale et de précision interne d'un canevas sont définies à partir des trois types d'erreurs suivantes :

- a) L'erreur interne s'analyse à partir de l'écart entre les coordonnées obtenues pour chaque point par les mesures de contrôle et celles que l'on obtient par calcul dans un système indépendant en appliquant une translation (et pour 2 ou 3 coordonnées, une rotation), la plus favorable possible, sur l'ensemble des coordonnées fournies pour ces points. Les éventuels points d'appui inclus dans le canevas figurent avec leurs coordonnées déterminées dans le système indépendant.
- b) L'erreur propre au réseau légal de référence est spécifiée par son gestionnaire, avec éventuellement plusieurs niveaux possibles en fonction des éléments du réseau effectivement utilisés lors du rattachement. Si la discordance relevée entre les points du réseau légal de référence est plus importante que la précision spécifiée par le gestionnaire, alors la précision est remplacée dans toutes les évaluations ultérieures par la discordance de rattachement effectivement constatée.
- c) L'erreur de rattachement s'analyse, lorsque cela est possible, à partir des écarts sur les mesures permettant le lien entre le réseau légal de référence et le canevas lui-même. Un rattachement ne peut être considéré comme effectué que si le canevas considéré est rattaché à suffisamment de points du réseau légal de référence pour mettre en évidence d'éventuelles discordances dans ce réseau. En outre, la précision fournie pour le rattachement doit être cohérente avec celle des éléments du réseau légal de référence effectivement utilisés pour celui-ci. Cette erreur de rattachement ne peut pas toujours être individualisée, ce qui est en particulier le cas lorsque les mesures du canevas offrent peu de surabondance.

### 6.1. Classe de précision totale

La classe de précision définie précédemment s'applique aux écarts entre les coordonnées fournies pour chaque point et celles que l'on obtient pour des mesures de contrôle. L'erreur totale résulte de la composition des erreurs internes, des erreurs de rattachement, et de l'erreur propre au réseau légal de référence. Donc l'erreur totale ne peut être inférieure à l'une de ces trois sources d'erreurs, et en particulier à l'erreur propre du réseau légal de référence, telle qu'elle est spécifiée ou telle qu'elle résulte des discordances relevées lors du rattachement.

### 6.2. Classe de précision interne

La classe de précision définie précédemment s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues pour chaque point par les mesures de contrôle et celles que l'on obtient par calcul dans un système indépendant en appliquant une translation (et pour 2 ou 3 coordonnées, une rotation), les plus favorables possible, sur l'ensemble des coordonnées fournies pour ces points. Les éventuels points d'appui inclus dans le canevas figurent avec leurs coordonnées déterminées dans le système indépendant.

### 6.3. Critères possibles

Les classes de précision des canevas doivent être spécifiées selon tout ou partie de 4 critères possibles : classe de précision planimétrique totale, classe de précision planimétrique interne, classe de précision altimétrique totale et classe de précision altimétrique interne, en suivant les définitions des points 6.1 et 6.2 ci-dessus.

## Article 7

Les classes de précision de levés d'objets géographiques sont relatives aux canevas qui leur servent de référence, et s'analysent selon 2 critères indépendants : classe de précision planimétrique par rapport au canevas, classe de précision altimétrique par rapport au canevas, selon les critères de l'article 2. Des classes de précision différentes peuvent être spécifiées pour des types d'objets géographiques différents dans un même levé.

### 7.1. Objets géographiques ponctuels

Si les spécifications l'indiquent, certains objets géographiques peuvent être considérés comme ponctuels. Ils sont alors déterminés par les coordonnées planimétriques et au besoin altimétriques de leur point de référence. La classe de précision s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues pour chaque point par une mesure de contrôle et les coordonnées fournies pour ces points ; les éventuels points d'appui et de canevas inclus dans le levé étant exclus des points testés.

### 7.2. Les objets géographiques linéaires, surfaciques et volumiques

Si les spécifications l'indiquent, ces objets sont définis uniquement à partir de lignes et de points, et certains de ces points peuvent ne pas être identifiables. Une surface est définie par un périmètre, un volume est défini par ses arêtes.

Les classes de précision sur les points identifiables sont spécifiées comme celles des objets géographiques ponctuels.

On dénomme points non identifiables ceux qui servent à la détermination d'un objet géographique linéaire, et dont la position le long de cet objet n'est pas précisément identifiée.

Sauf spécification contraire figurant au cahier de charges, les classes de précision sur les lignes joignant des points non identifiables s'appliquent à l'écart entre le terrain nominal et les segments de droites joignant ces points. Cet écart est mesuré par la plus petite distance entre le point de contrôle et la ligne levée, chaque point de contrôle étant choisi le plus près possible de l'un des points levés.

### 7.3. Spécifications de contenu

Les objets géographiques faisant l'objet du levé sont rangés par classes en fonction des spécifications de contenu qui précisent aussi les critères de sélection retenus, conformément au terrain nominal. Les spécifications s'appliquent indépendamment aux objets mal classés et aux objets oubliés ou surnuméraires, en spécifiant les gabarits d'erreurs correspondants décrits à l'article 4.

### 7.4. Représentation altimétrique du terrain

La représentation altimétrique du terrain utilise des points du terrain nominal définis par des coordonnées altimétriques et planimétriques. Ces points sont reliés par des arêtes destinées à structurer un modèle de surface (maillage régulier, triangulation, courbe de niveau, etc.). Les classes de précision s'appliquent à l'écart entre le terrain nominal et la surface levée. Les points de contrôle sont pris à la verticale des points du modèle de surface.

Le terrain nominal introduit un certain niveau de simplifications et de lissage de la réalité en fonction du pas d'échantillonnage ou de l'espacement des courbes de niveau. Les écarts entre le terrain nominal et le terrain réel doivent rester inférieurs à la classe de précision spécifiée.

Les réseaux des lignes de thalweg, de crêtes et de rupture de pente sont considérés comme des objets géographiques linéaires et font l'objet de spécifications propres. Leurs classes de précision planimétrique et altimétrique suivent les spécifications des objets géographiques linéaires, surfaciques et volumiques.

## Article 8

Les spécifications de précision applicables aux images rectifiées et aux documents cartographiques scannés et remis en géométrie s'analysent selon 5 paramètres ci-après ; un au moins parmi les deux premiers étant obligatoire et les trois derniers étant facultatifs :

### 8.1. Classe de précision interne

La classe de précision définie précédemment s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues par les mesures de contrôle, pour des détails bien identifiés, calculées dans un système indépendant, et celles que l'on obtient par calcul en appliquant une rotation et une translation, les plus favorables possible, sur l'ensemble des coordonnées de ces points obtenues dans l'image ou le document, également dans

un système indépendant. Le système de coordonnées planes de contrôle sera caractérisé par le même système de représentation plane que celui des coordonnées des points évalués. La classe de précision ne peut être meilleure que la taille du pixel utilisé.

## 8.2. Classe de précision totale

La classe de précision définie précédemment s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues par les mesures de contrôle, pour des détails bien identifiés, et celles des coordonnées de ces points obtenues dans l'image ou le document. Le système de coordonnées planes de contrôle sera caractérisé par le même système de représentation plane que celui des coordonnées des points évalués. La classe de précision ne peut être meilleure que la taille du pixel utilisé.

## 8.3. Redressement des objets géographiques du sur-sol

La spécification doit préciser si les erreurs internes décrites à l'article 6.1 s'appliquent uniquement aux objets géographiques au sol ou également aux objets du sur-sol.

## 8.4. Qualité radiométrique du mosaïquage

S'il y a effectivement eu un mosaïquage, la classe de précision sera exprimée par la différence de valeur radiométrique par canal tolérée sur les raccords entre images ne correspondant pas à un linéament, divisée par la radiométrie maximale de l'image et exprimée sous forme de pourcentage.

## 8.5. Qualité géométrique du mosaïquage

La classe de précision s'applique, conformément aux éléments définis précédemment et s'il y a effectivement eu un mosaïquage, aux distances entre les points en bordure d'une des images assemblées au sein du document final et les mêmes points tels qu'ils seraient représentés dans l'image voisine si elle était prolongée jusque-là, les points étant caractérisés par des coordonnées sous forme de pixels. Ces distances sont mesurées sur des points n'offrant aucune ambiguïté d'identification sur les deux images voisines concourant au document final.

## Article 9

Le présent arrêté sera publié au Journal officiel de la République française.

Fait à Paris, le 16 septembre 2003.

Gilles de Robien

## Annexe 7

# RÉSULTATS DES TESTS GNSS

Cette annexe présente l'ensemble des résultats obtenus lors de la campagne GNSS sur la Ville de Rennes et Rennes Métropole hors Ville de Rennes.

$\Delta$  représentera la valeur vraie moins la valeur obtenue en GNSS.

### Ville de Rennes

|                          | Temps réel Trimble R8 (moyenne) |    |     |    |     |    |
|--------------------------|---------------------------------|----|-----|----|-----|----|
|                          | X                               |    | Y   |    | Z   |    |
|                          | nbr                             | %  | nbr | %  | nbr | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 2                               | 50 | 3   | 75 | 3   | 75 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 2                               | 50 | 1   | 25 | 1   | 25 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 0                               | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  |
| Écarts entre 31 et 40 mm | 0                               | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  |

Figure 54 : Répartition des écarts moyens du Trimble R8 en temps réel sur la Ville de Rennes.

|                          | Post traitement Trimble |    |     |    |     |     |
|--------------------------|-------------------------|----|-----|----|-----|-----|
|                          | X                       |    | Y   |    | Z   |     |
|                          | nbr                     | %  | nbr | %  | nbr | %   |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 2                       | 50 | 3   | 75 | 4   | 100 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 2                       | 50 | 1   | 25 | 0   | 0   |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 0                       | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   |

Figure 55 : Répartition des écarts du Trimble R8 en post traitement sur la Ville de Rennes.

|                          | Temps réel Leica GS15 (moyenne) |    |     |    |     |    |
|--------------------------|---------------------------------|----|-----|----|-----|----|
|                          | X                               |    | Y   |    | Z   |    |
|                          | nbr                             | %  | nbr | %  | nbr | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 2                               | 50 | 3   | 75 | 2   | 50 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 2                               | 50 | 0   | 0  | 2   | 50 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 0                               | 0  | 1   | 25 | 0   | 0  |
| Écarts entre 31 et 40 mm | 0                               | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  |

Figure 56 : Répartition des écarts moyens du Leica GS15 en temps réel sur la Ville de Rennes.

|                          | Post traitement Leica GS15 |    |     |    |     |     |
|--------------------------|----------------------------|----|-----|----|-----|-----|
|                          | X                          |    | Y   |    | Z   |     |
|                          | nbr                        | %  | nbr | %  | nbr | %   |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 1                          | 25 | 2   | 50 | 0   | 0   |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 3                          | 75 | 1   | 25 | 4   | 100 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 0                          | 0  | 1   | 25 | 0   | 0   |
| Écarts entre 31 et 40 mm | 0                          | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   |

Figure 57 : Répartition des écarts du Leica GS15 en post traitement sur la Ville de Rennes.

## Rennes Métropole

### Planimétrie (comparaison par rapport aux points déterminés par post traitement sous TBC)

| Points | Temps réel     |                |                         |
|--------|----------------|----------------|-------------------------|
|        | $\Delta X$ (m) | $\Delta Y$ (m) | Écart en position2D (m) |
| BOU1   | -0.014         | -0.030         | 0.033                   |
| BOU2   | -0.009         | -0.014         | 0.017                   |
| CES1   | -0.003         | -0.001         | 0.003                   |
| CHA1   | -0.012         | -0.004         | 0.013                   |
| CHE1   | 0.000          | -0.001         | 0.001                   |
| CIN1   | -0.009         | -0.011         | 0.014                   |
| COR1   | -0.010         | -0.001         | 0.010                   |
| LAI1   | -0.009         | -0.002         | 0.009                   |
| LCF1   | -0.017         | -0.016         | 0.023                   |
| LVE1   | -0.009         | -0.009         | 0.013                   |
| LHE1   | -0.003         | -0.016         | 0.017                   |
| MOR1   | -0.005         | -0.016         | 0.017                   |
| NOY1   | -0.008         | -0.005         | 0.009                   |
| PAR1   | -0.017         | -0.010         | 0.020                   |
| SGR1   | -0.004         | -0.018         | 0.019                   |
| SJL1   | 0.012          | -0.004         | 0.013                   |
| TFO1   | 0.000          | 0.000          | 0.001                   |
| VSE1   | -0.001         | -0.025         | 0.025                   |
|        | -0.007         | -0.010         | 0.014                   |

Figure 58 : Ecart en planimétrie des points sur Rennes Métropole avec la technique du temps réel.

|                          | Temps réel individuel Trimble R8 |    |
|--------------------------|----------------------------------|----|
|                          | X,Y                              |    |
|                          | nbr                              | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 70                               | 51 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 48                               | 35 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 14                               | 10 |
| Écarts entre 31 et 41 mm | 6                                | 4  |

Figure 59 : Répartition des écarts planimétriques individuels du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole.

|                          | Temps réel moyenne Trimble R8 |    |
|--------------------------|-------------------------------|----|
|                          | X,Y                           |    |
|                          | nbr                           | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 22                            | 65 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 10                            | 29 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 2                             | 6  |
| Écarts entre 31 et 41 mm | 0                             | 0  |

Figure 60 : Répartition des écarts planimétriques moyens du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole.

### Altimétrie (comparaison par rapport aux points déterminés par nivellement direct)

- Temps réel

| Points | Temps réel<br>$\Delta Z$ (m) |
|--------|------------------------------|
| BOU1   | 0.023                        |
| BOU2   | 0.032                        |
| CES1   | 0.024                        |
| CHA1   | 0.046                        |
| CHE1   | 0.016                        |
| CIN1   | 0.014                        |
| COR1   | 0.057                        |
| LAI1   | 0.043                        |
| LCF1   | 0.025                        |
| LVE1   | 0.028                        |
| LHE1   | 0.023                        |
| MOR1   | 0.033                        |
| NOY1   | 0.025                        |
| PAR1   | 0.021                        |
| SGR1   | 0.006                        |
| SJL1   | 0.005                        |
| TFO1   | 0.031                        |
| VSE1   | 0.023                        |

0.026

Figure 61 : Ecart en altimétrie des points sur Rennes Métropole avec la technique du temps réel.

|                           | Temps réel individuel Trimble R8 |    |
|---------------------------|----------------------------------|----|
|                           | Z                                |    |
|                           | nbr                              | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm   | 12                               | 18 |
| Écarts entre 11 et 20 mm  | 13                               | 19 |
| Écarts entre 21 et 30 mm  | 23                               | 34 |
| Écarts entre 31 et 40 mm  | 10                               | 15 |
| Écarts entre 41 et 50 mm  | 5                                | 7  |
| Écarts entre 51 et 60 mm  | 1                                | 1  |
| Écarts entre 61 et 70 mm  | 0                                | 0  |
| Écarts entre 71 et 80 mm  | 1                                | 1  |
| Écarts entre 81 et 90 mm  | 1                                | 1  |
| Écarts entre 91 et 100 mm | 2                                | 3  |

Figure 62 : Répartition des écarts planimétriques individuels du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole.

|                          | Temps réel moyenne Trimble R8 |    |
|--------------------------|-------------------------------|----|
|                          | Z                             |    |
|                          | nbr                           | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 2                             | 12 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 2                             | 12 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 8                             | 47 |
| Écarts entre 31 et 40 mm | 2                             | 12 |
| Écarts entre 41 et 50 mm | 2                             | 12 |
| Écarts entre 51 et 60 mm | 1                             | 6  |

Figure 63 : Répartition des écarts planimétriques moyens du Trimble R8 en temps réel sur Rennes Métropole.

- Post traitement

| Points  | Post traitement       |                       |                           |
|---------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
|         | TBC<br>$\Delta Z$ (m) | LGO<br>$\Delta Z$ (m) | Bernese<br>$\Delta Z$ (m) |
| BOU1    | 0.033                 | 0.025                 | 0.029                     |
| CES1    | 0.020                 | 0.019                 | 0.029                     |
| CHA1    | 0.038                 | 0.024                 | 0.052                     |
| CHE1    | 0.026                 | 0.008                 | 0.019                     |
| CIN1    | 0.031                 | 0.012                 | 0.019                     |
| COR1    | 0.038                 | 0.023                 | 0.036                     |
| LAI1    | 0.020                 | -0.007                | 0.020                     |
| LCF1    | 0.016                 | 0.007                 | 0.031                     |
| LVE1    | 0.016                 | 0.013                 | 0.017                     |
| LHE1    | 0.005                 | -0.002                | 0.002                     |
| MOR1    | 0.041                 | 0.004                 | 0.039                     |
| NOY1    | 0.034                 | 0.008                 | 0.036                     |
| PAR1    | 0.000                 | -0.012                | 0.016                     |
| SGR1    | 0.000                 | 0.006                 | 0.003                     |
| SJL1    | 0.011                 | 0.007                 | 0.019                     |
| TFO1    | 0.022                 | 0.013                 | 0.017                     |
| VSE1    | 0.037                 | 0.009                 | 0.027                     |
| Moyenne | 0.023                 | 0.009                 | 0.024                     |

Figure 64 : Ecart en altimétrie des points sur Rennes Métropole avec la technique du post traitement.

|                          | Post Traitement Bernese |    |
|--------------------------|-------------------------|----|
|                          | Z                       |    |
|                          | nbr                     | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 2                       | 12 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 7                       | 41 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 3                       | 18 |
| Écarts entre 31 et 36 mm | 3                       | 18 |
| Écarts entre 37 et 40 mm | 1                       | 6  |
| Écarts entre 41 et 50 mm | 1                       | 6  |

Figure 65 : Répartition des écarts altimétriques du Trimble R8 en post traitement Bernese sur Rennes Métropole.

|                          | Post Traitement LGO |    |
|--------------------------|---------------------|----|
|                          | Z                   |    |
|                          | nbr                 | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 9                   | 53 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 5                   | 29 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 3                   | 18 |

Figure 66 : Répartition des écarts altimétriques du Trimble R8 en post traitement LGO sur Rennes Métropole.

|                          | Post traitement TBC |    |
|--------------------------|---------------------|----|
|                          | Z                   |    |
|                          | nbr                 | %  |
| Écarts entre 0 et 10 mm  | 4                   | 24 |
| Écarts entre 11 et 20 mm | 5                   | 29 |
| Écarts entre 21 et 30 mm | 1                   | 6  |
| Écarts entre 31 et 36 mm | 2                   | 12 |
| Écarts entre 37 et 40 mm | 5                   | 29 |

Figure 67 : Répartition des écarts altimétriques du Trimble R8 en post traitement TBC sur Rennes Métropole.

## Préconisations sur le calcul en post traitement

| Points  | Méthode Multi station         |                               |                         | Méthode Station unique RENN   |                               |                         | Longueur ligne de base RENN_Pt |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
|         | $\Delta Z$ Trimble R8 TBC (m) | $\Delta Z$ Trimble R8 LGO (m) | $\Delta Z$ Viva LGO (m) | $\Delta Z$ Trimble R8 TBC (m) | $\Delta Z$ Trimble R8 LGO (m) | $\Delta Z$ Viva LGO (m) |                                |
| S101    | 0,003                         | 0,005                         | 0,017                   | 0,004                         | 0,005                         | 0,017                   | 1,7 m                          |
| S265    | 0,009                         | 0,010                         | -0,020                  | 0,009                         | 0,008                         | -0,017                  | 3074 m                         |
| S295    | 0,005                         | 0,014                         | -0,011                  | 0,013                         | 0,012                         | -0,013                  | 3714 m                         |
| S385    | 0,002                         | 0,006                         | -0,018                  | 0,006                         | 0,004                         | -0,033                  | 3812 m                         |
| SGR1    | 0,000                         | 0,008                         |                         | -0,001                        | 0,006                         |                         | 4784 m                         |
| CES1    | 0,020                         | 0,021                         |                         | 0,017                         | 0,019                         |                         | 4896 m                         |
| SJL1    | 0,011                         | 0,009                         |                         | 0,017                         | 0,007                         |                         | 6418 m                         |
| NOY1    | 0,034                         | 0,008                         |                         | 0,029                         | 0,008                         |                         | 7853 m                         |
| VSE1    | 0,037                         | 0,010                         |                         | 0,029                         | 0,009                         |                         | 8077 m                         |
| TFO1    | 0,022                         | 0,016                         |                         | 0,015                         | 0,013                         |                         | 8136 m                         |
| LCF1    | 0,016                         | 0,010                         |                         | 0,015                         | 0,007                         |                         | 9017 m                         |
| CHA1    | 0,038                         | 0,023                         |                         | 0,032                         | 0,024                         |                         | 11 229 m                       |
| LHE1    | 0,005                         | 0,002                         |                         | 0,009                         | -0,002                        |                         | 11 317 m                       |
| CHE1    | 0,026                         | 0,010                         |                         | 0,034                         | 0,008                         |                         | 11 803 m                       |
| BOU1    | 0,033                         | 0,024                         |                         | 0,041                         | 0,025                         |                         | 12 987 m                       |
| MOR1    | 0,041                         | 0,011                         |                         | 0,040                         | 0,004                         |                         | 13 675 m                       |
| LAI1    | 0,020                         | -0,007                        |                         | 0,029                         | -0,007                        |                         | 14 858 m                       |
| CIN1    | 0,031                         | 0,019                         |                         | 0,036                         | 0,012                         |                         | 15 075 m                       |
| COR1    | 0,038                         | 0,029                         |                         | 0,041                         | 0,023                         |                         | 15 258 m                       |
| PAR1    | 0,000                         | -0,010                        |                         | 0,003                         | -0,012                        |                         | 15 280 m                       |
| LVE1    | 0,016                         | 0,018                         |                         | 0,019                         | 0,013                         |                         | 20 222 m                       |
| Moyenne | 0,019                         | 0,011                         | -0,008                  | 0,021                         | 0,009                         | -0,012                  |                                |

Figure 68 : Écarts altimétriques du Trimble R8 et du Leica Viva GS15 en fonction du logiciel et de la méthode de calcul.

| Points | $\Delta Z$ (m)<br>éphémérides<br>radiodiffusées | $\Delta Z$ (m)<br>éphémérides<br>rapides | $\Delta Z$ (m)<br>éphémérides<br>finales |
|--------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| BOU1   | 0.041                                           | 0.039                                    | 0.038                                    |
| BOU2   | 0.038                                           | 0.039                                    | 0.039                                    |
| CES1   | 0.023                                           | 0.024                                    | 0.023                                    |
| CHA1   | 0.039                                           | 0.039                                    | 0.037                                    |
| CHE1   | 0.028                                           | 0.027                                    | 0.027                                    |
| CIN1   | 0.038                                           | 0.034                                    | 0.032                                    |
| COR1   | 0.038                                           | 0.040                                    | 0.040                                    |
| LAI1   | 0.021                                           | 0.022                                    | 0.020                                    |
| LCF1   | 0.018                                           | 0.020                                    | 0.020                                    |
| LVE1   | 0.023                                           | 0.017                                    | 0.015                                    |
| LHE1   | 0.004                                           | 0.007                                    | 0.006                                    |
| MOR1   | 0.044                                           | 0.042                                    | 0.040                                    |
| NOY1   | 0.033                                           | 0.036                                    | 0.036                                    |
| PAR1   | 0.011                                           | 0.011                                    | 0.003                                    |
| SGR1   | 0.000                                           | 0.002                                    | 0.000                                    |
| SJL1   | 0.013                                           | 0.011                                    | 0.010                                    |
| TFO1   | 0.025                                           | 0.027                                    | 0.021                                    |
| VSE1   | 0.034                                           | 0.036                                    | 0.037                                    |

Figure 69 : Comparaison des écarts en altitude en fonction des éphémérides.

| Points  | $\Delta Z$ (m)<br>GLONASS<br>+ GPS | $\Delta Z$ (m)<br>GPS |
|---------|------------------------------------|-----------------------|
| BOU1    | 0.038                              | 0.033                 |
| BOU2    | 0.039                              | 0.036                 |
| CES1    | 0.023                              | 0.020                 |
| CHA1    | 0.037                              | 0.038                 |
| CHE1    | 0.027                              | 0.026                 |
| CIN1    | 0.032                              | 0.031                 |
| COR1    | 0.040                              | 0.038                 |
| LAI1    | 0.020                              | 0.020                 |
| LCF1    | 0.020                              | 0.016                 |
| LVE1    | 0.015                              | 0.016                 |
| LHE1    | 0.006                              | 0.005                 |
| MOR1    | 0.040                              | 0.041                 |
| NOY1    | 0.036                              | 0.034                 |
| PAR1    | 0.003                              | 0.001                 |
| SGR1    | 0.000                              | 0.000                 |
| SJL1    | 0.010                              | 0.011                 |
| TFO1    | 0.021                              | 0.022                 |
| VSE1    | 0.037                              | 0.037                 |
| Moyenne | 0.025                              | 0.024                 |

Figure 70 : Comparaison des écarts en altitude en fonction de la constellation satellitaire.

La méthode décrite dans § 1.2.2.2 sur le nivellement par GNSS a également été testée entre les points avec les observations précédentes. Cependant, contrairement aux préconisations de l'IGN, les observations n'ont pas pu être réalisées simultanément. La précision centimétrique donnée par l'IGN a été confirmée. En effet, nous avons pu calculer sept points situés à moins de cinq kilomètres d'un autre de cette façon. La moyenne des écarts ainsi obtenue en valeur absolue est de 4,8 cm. Cette méthode est donc à utiliser seulement lorsque le nivellement direct est impossible et que la

détermination en post traitement est trop difficile à mettre en place. Il faudra bien garder en tête que la précision de cette méthode est centimétrique, c'est-à-dire inférieure ou égale à cinq centimètres.

Enfin, le calcul de PPP online également a été testé sur plusieurs sites internet comme par exemple Canada Centre for Remote Sensing ou bien Magic GNSS. Les résultats peuvent être considérés comme plus ou moins satisfaisants selon les sites utilisés, mais pas assez pour être utilisés dans le cadre de canevas de précision. En effet, nous n'avons fourni que des fichiers d'observation de deux heures ce qui n'est pas suffisant pour ce genre de calcul. Par exemple, un écart en position 3D pour Magic GNSS de 8cm a été obtenu. Néanmoins, le grand avantage de ces calculs est qu'ils ne nécessitent pas de logiciels de traitement et que les résultats sont obtenus quelques minutes plus tard.

## Annexe 8

# MODE D'EMPLOI TRIMBLE BUSINESS CENTER

Une notice d'utilisation a été réalisée pour TBC car ce logiciel était très peu utilisé avant le PFE. En effet, ce dernier a été mis en place un mois avant le début de ce projet. La notice d'utilisation sous LGO n'a pas été réalisée car l'ensemble des agents maîtrise très bien ce logiciel.

Création d'une nouvelle étude. **Démarrer une nouvelle étude**

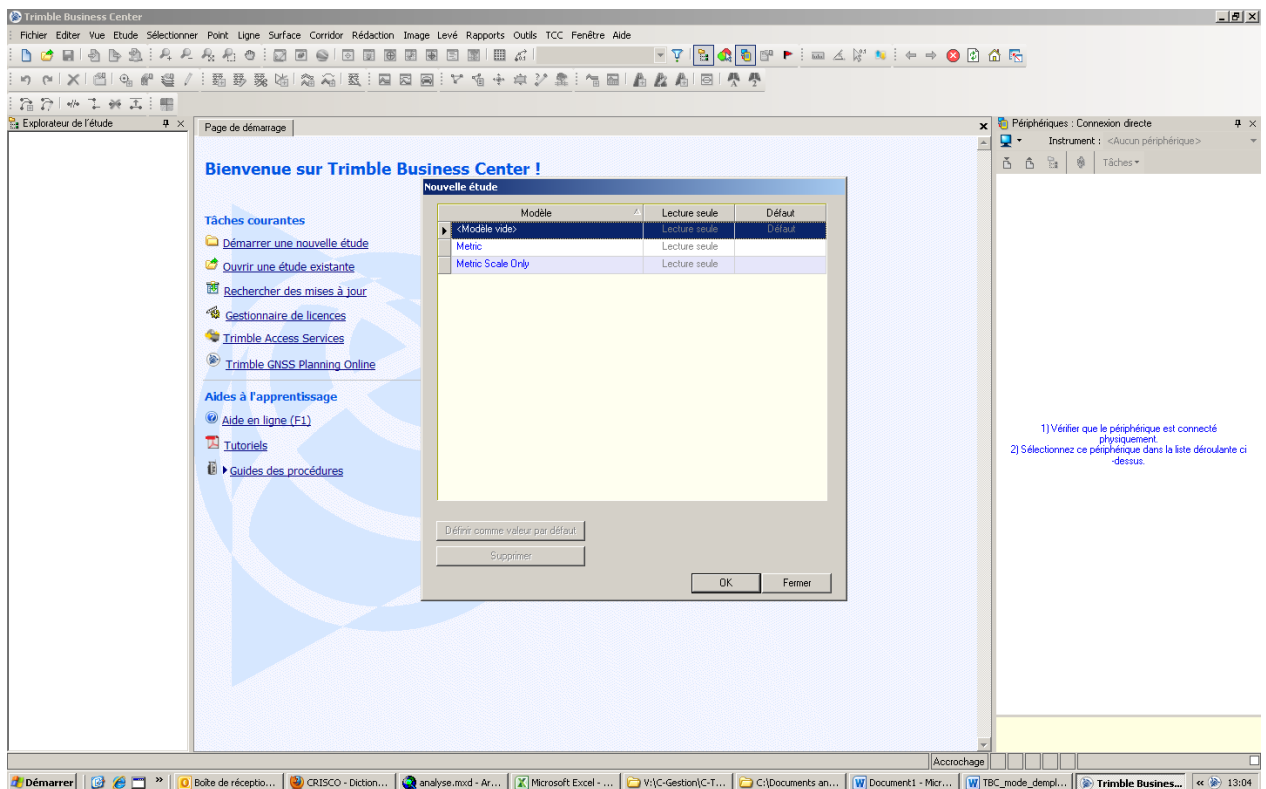


Figure 71 : Création d'une nouvelle étude.

Par la suite, il faut paramétrer cette nouvelle étude. **Étude (Paramètres de l'étude)**

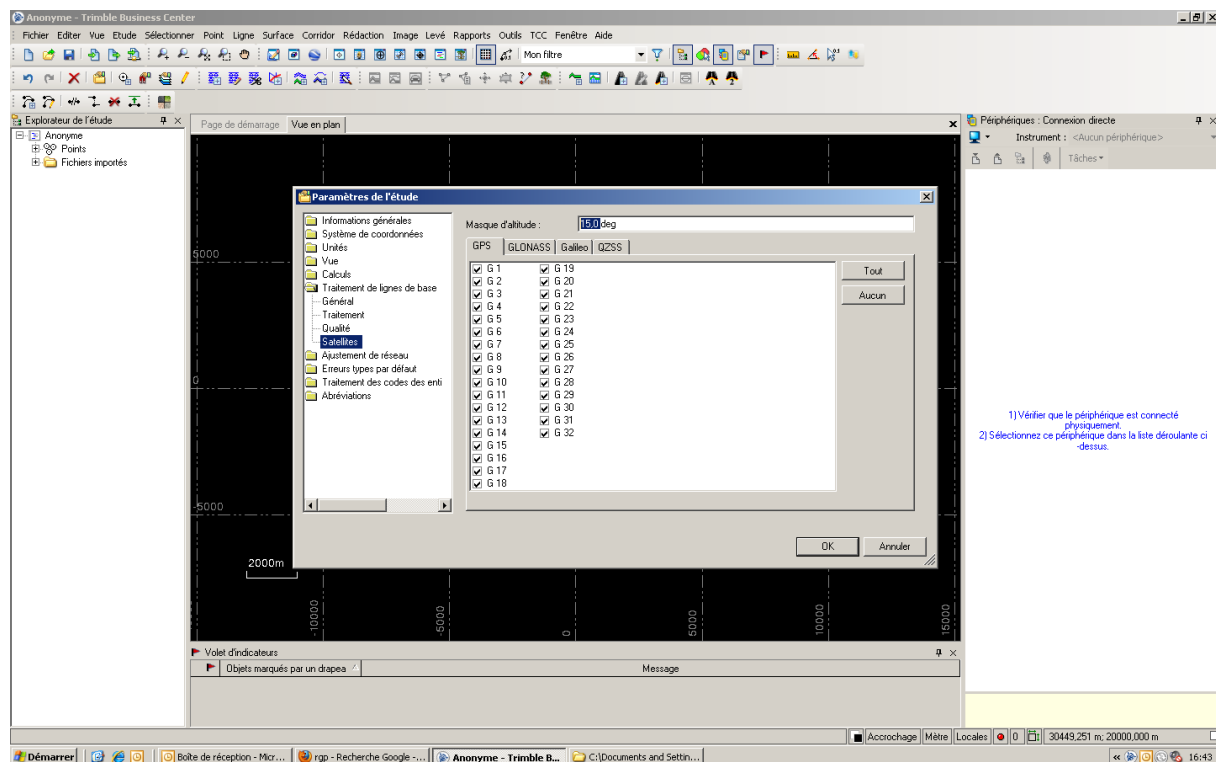


Figure 72 : Changer le masque à 15 degré.

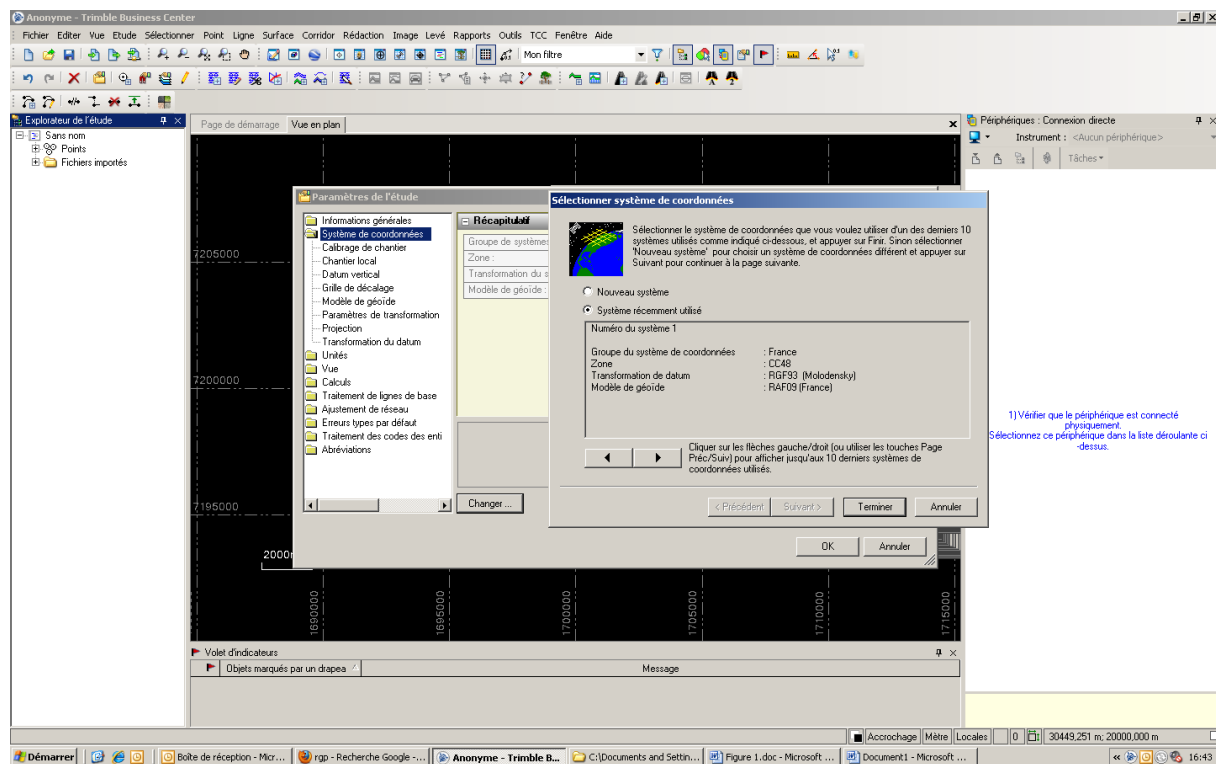


Figure 73 : Mettre l'étude dans le bon système de coordonnées.

## Annexes

Ensuite, importation des fichiers de levé sous TBC en les faisant glisser dans la fenêtre vue en plan. À ce moment, il faut vérifier et changer si nécessaire le nom du point et la hauteur de l'antenne.

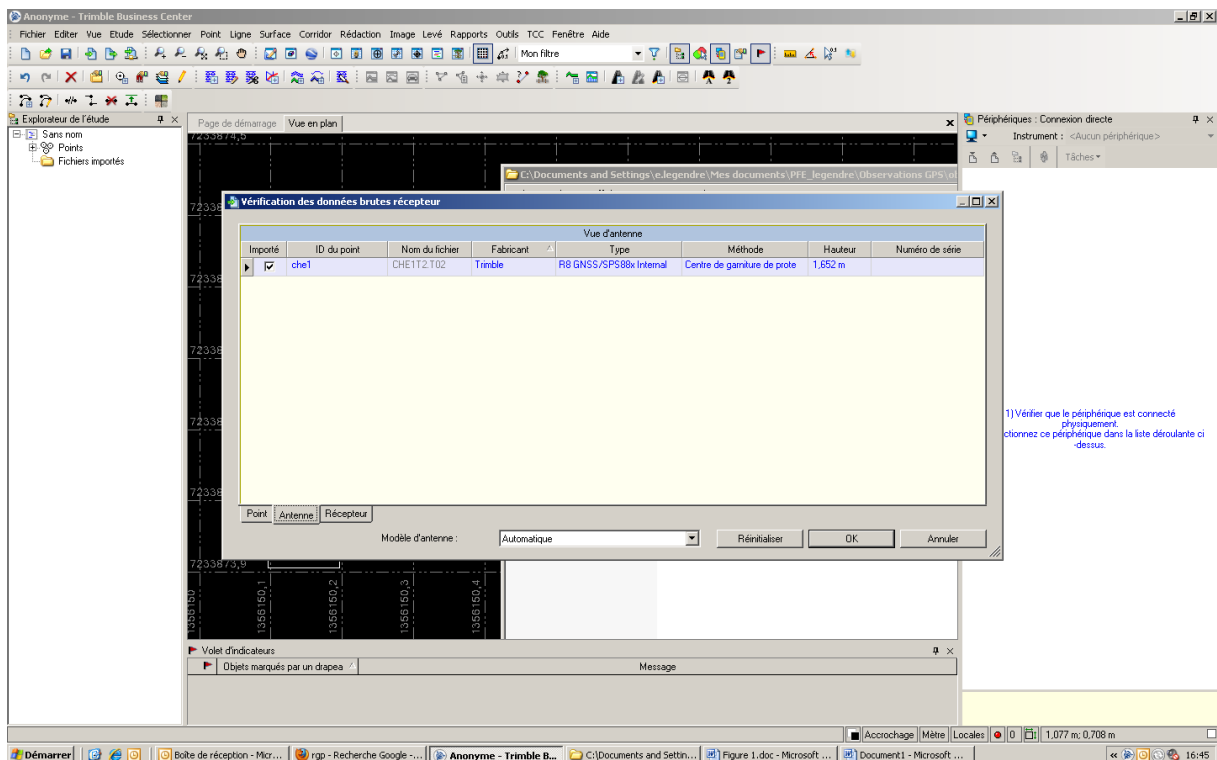


Figure 74 : Importation du fichier de levé.

Faire la même chose avec le fichier téléchargé sur le site de l'IGN contenant l'ensemble des stations de référence.

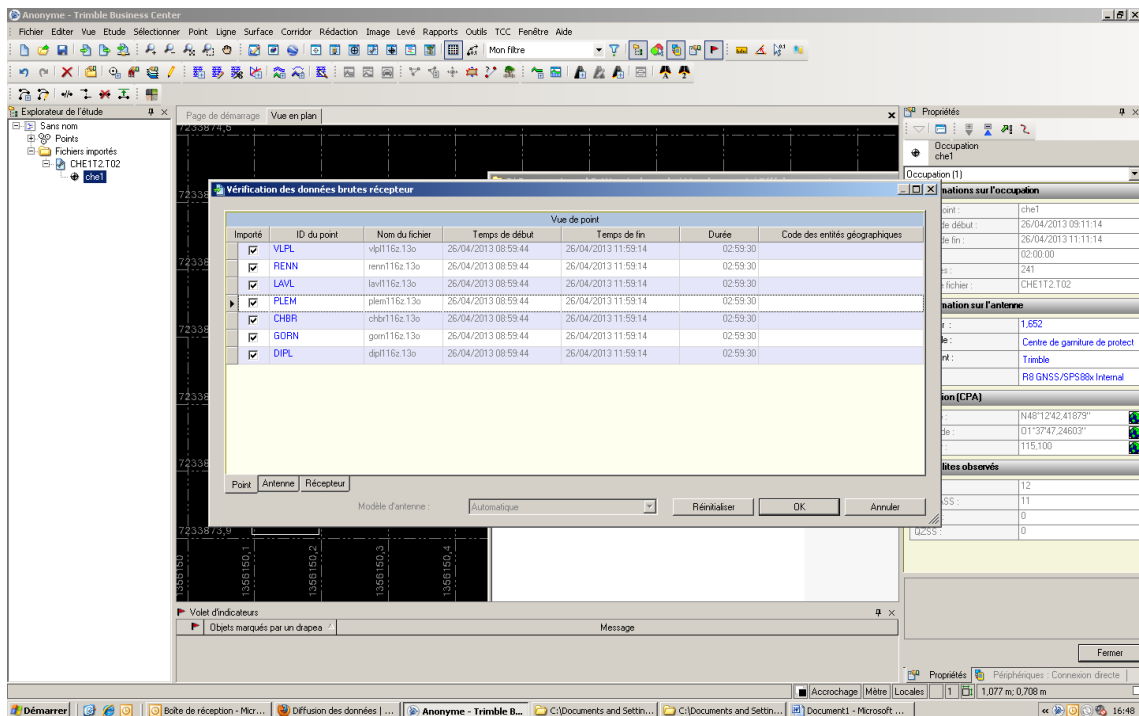


Figure 75 : Importer les données des stations de référence disponible sur le site de l'IGN.

Regarder la vue temporelle, cela permet de vérifier que les stations de référence et le point couvrent la même zone temps. **Vue (Nouvelle vue temporelle)**

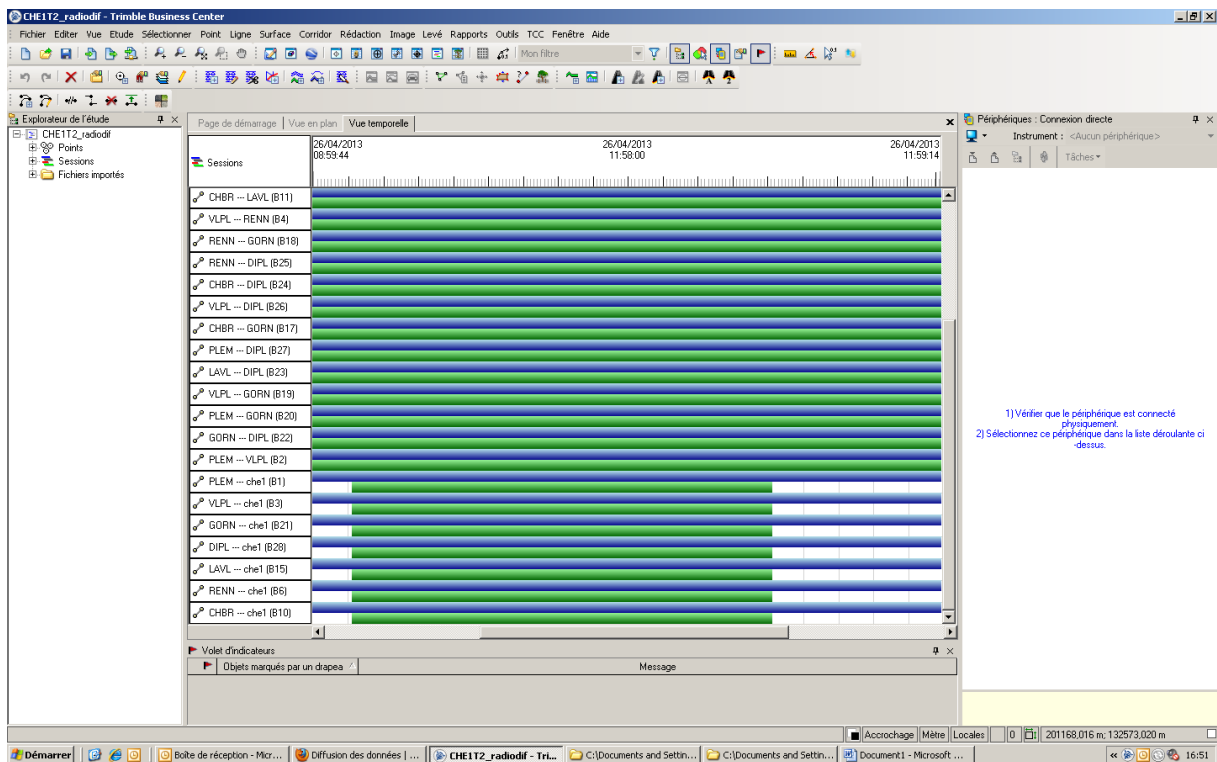


**Figure 76 : Vue temporelle.**

On vérifie par la suite l'occupation des satellites. Dans la vue temporelle, clic droit sur la session voulue (**Éditeur de sessions**). Si besoin, on peut couper les satellites ayant eu des coupures.

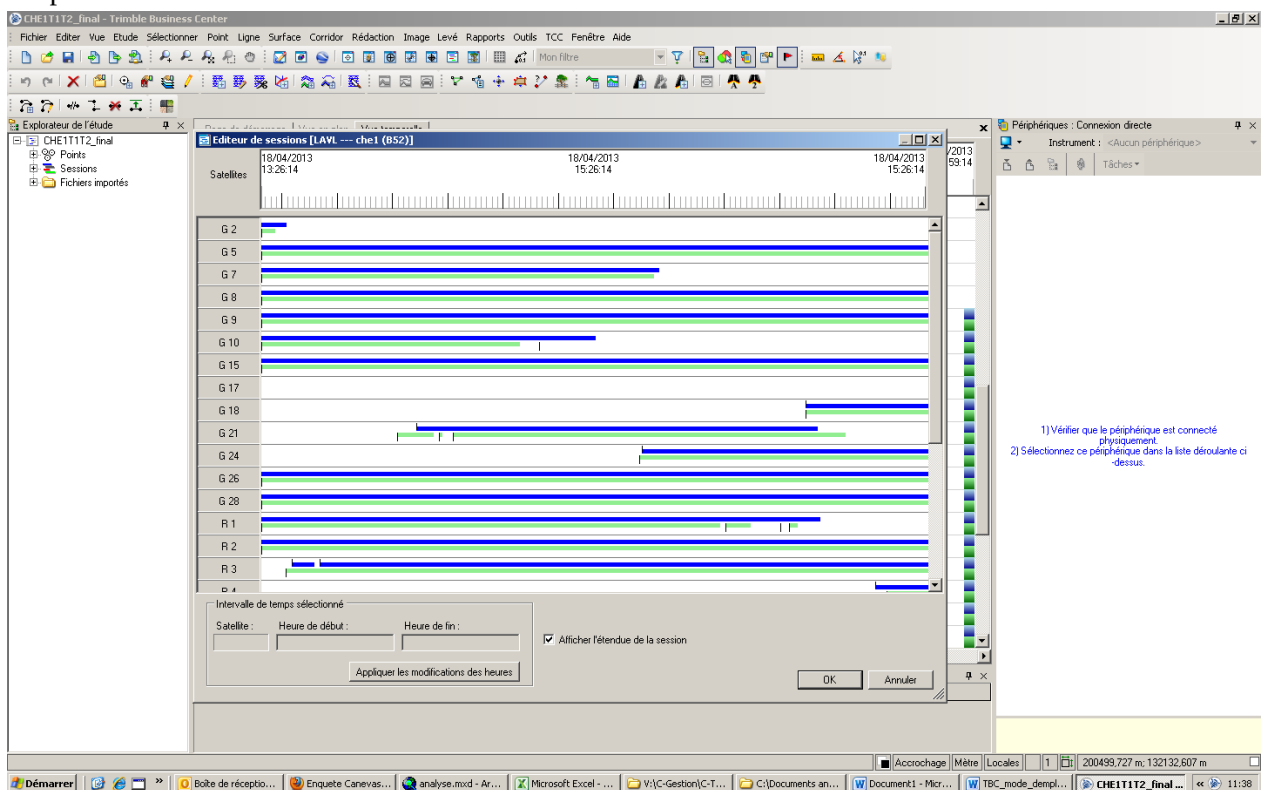


**Figure 77 : Éditer les sessions.**

Choix des éphémérides disponible. Téléchargement internet

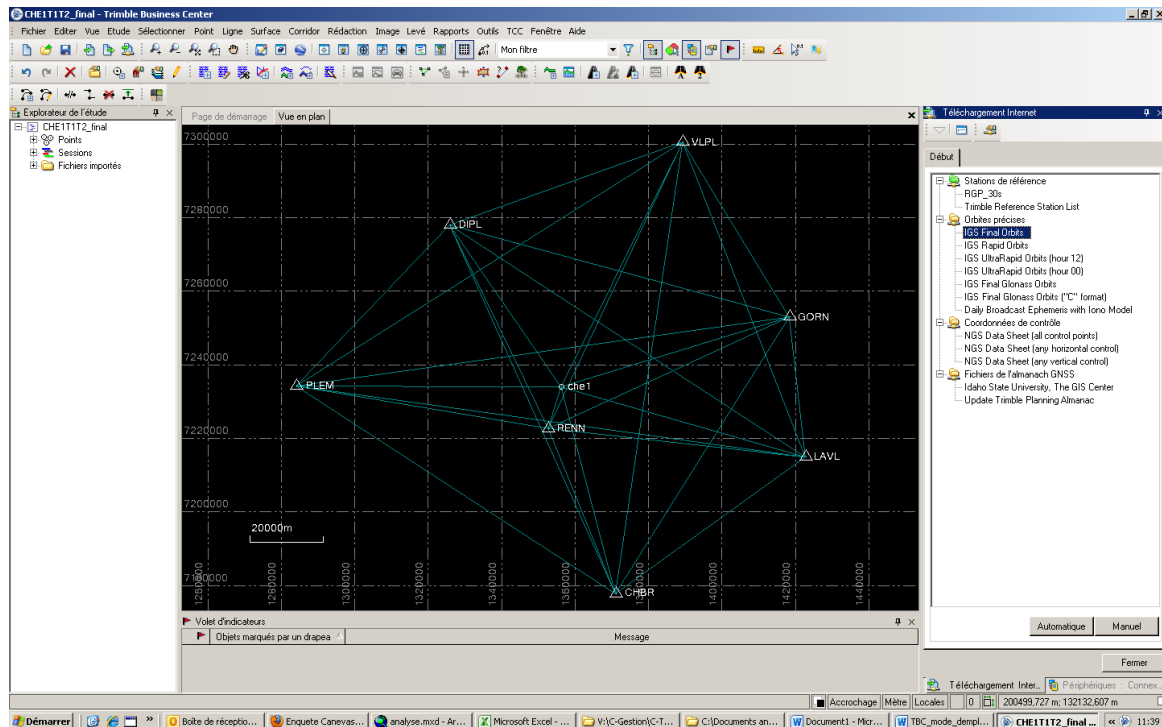


Figure 78 : Choisir les éphémérides.

Passer chaque point de référence en qualité du contrôle

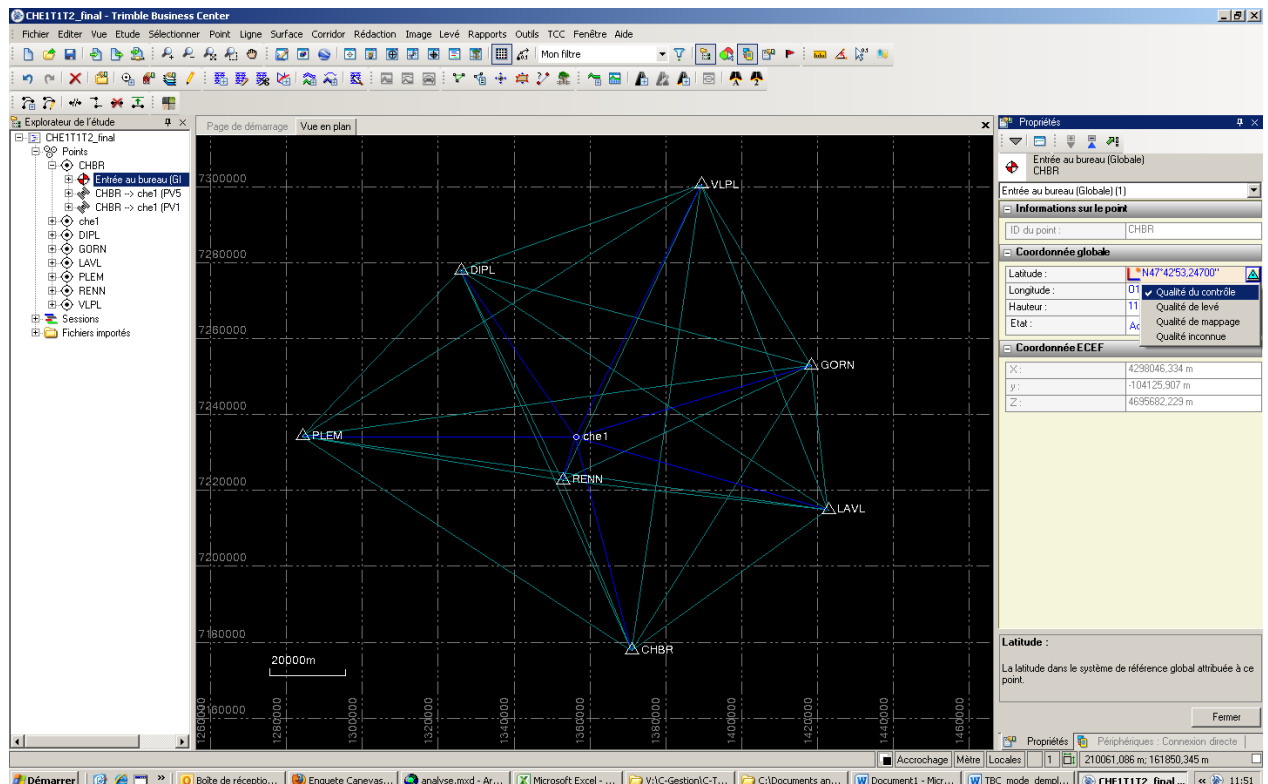


Figure 79 : Point de référence en qualité du contrôle.

Sélectionner l'ensemble des lignes de base partant du point à calculer et lancer le calcul des lignes de base. **Levé → Traiter des lignes de base**

Analyser le traitement, précision horizontale, verticale et RMS, si besoin décocher certaines lignes de base.

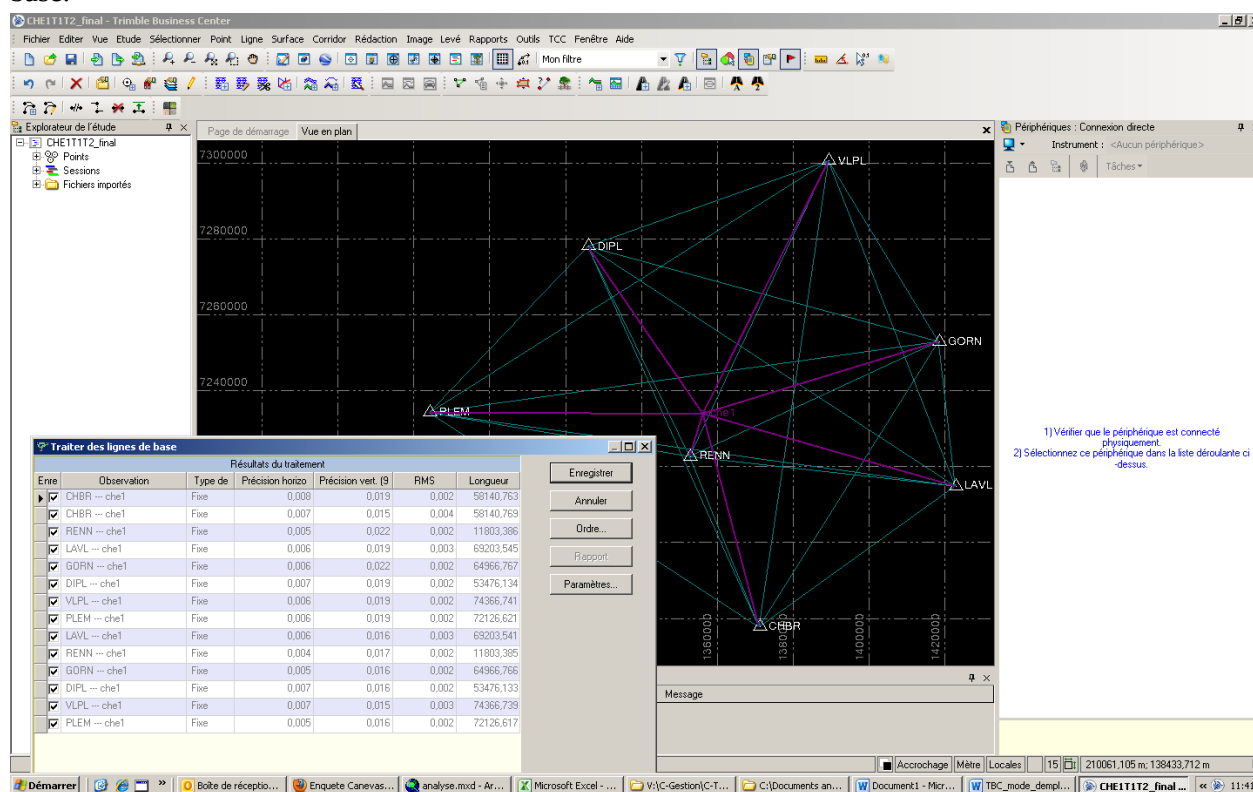


Figure 80 : Traiter les lignes de base.

On peut par la suite générer un rapport sur les lignes de base. **Rapports (Rapport sur le traitement des lignes de base)**. Il contient: le choix des éphémérides, le modèle de l'antenne, les précisions altimétriques et planimétriques, l'occupation des satellites et les résidus sur ces derniers.

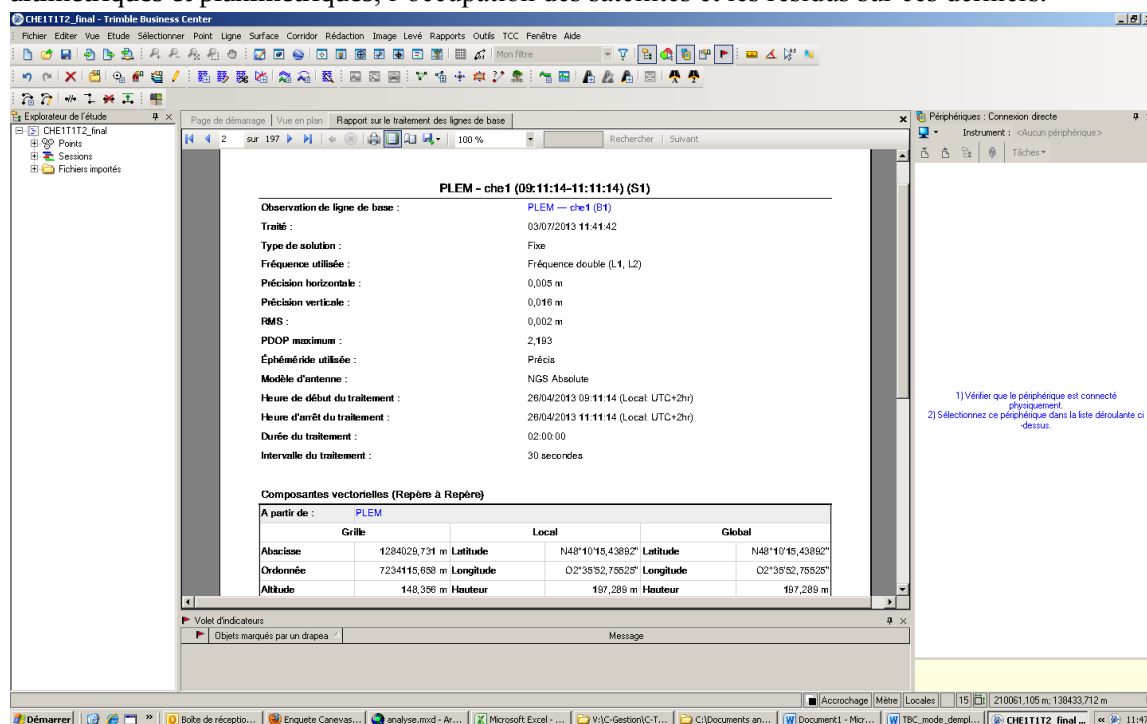


Figure 81 : Rapport de traitement des lignes de base.

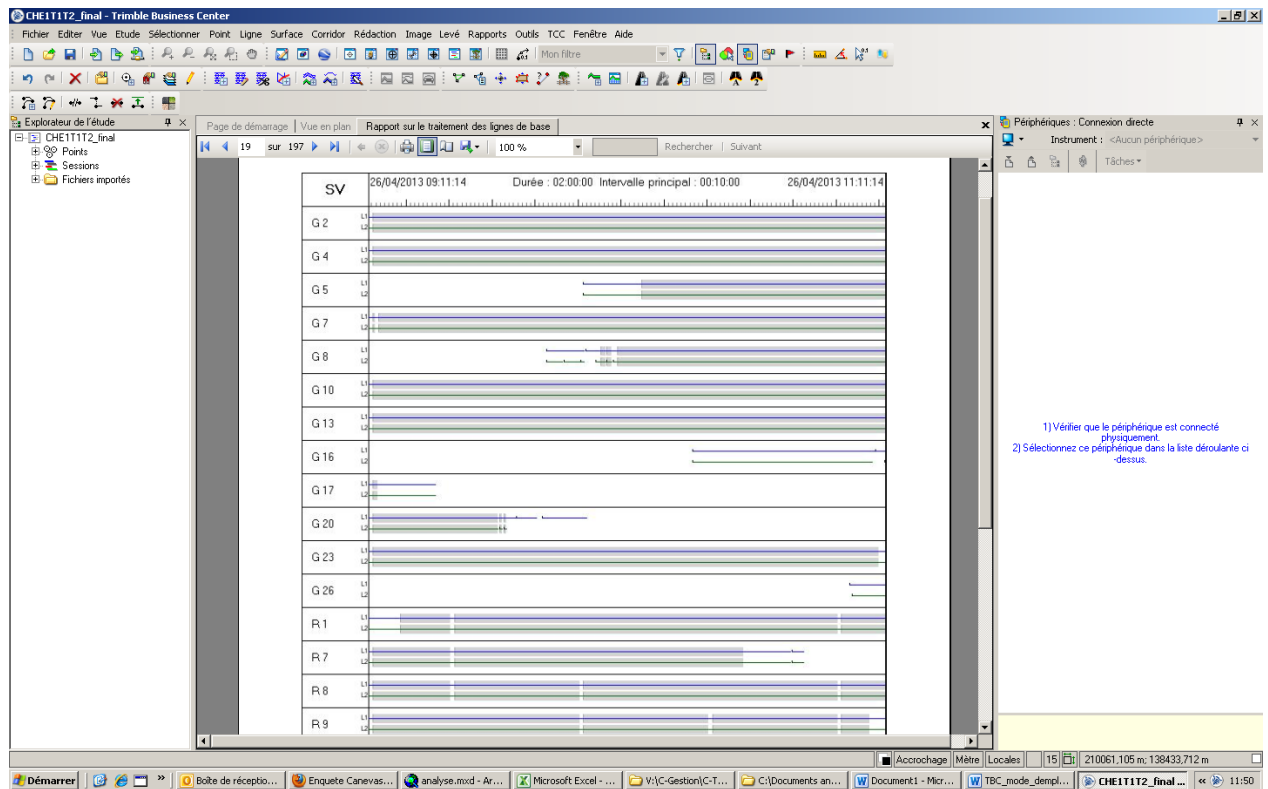


Figure 82 : Exemple de poursuite.

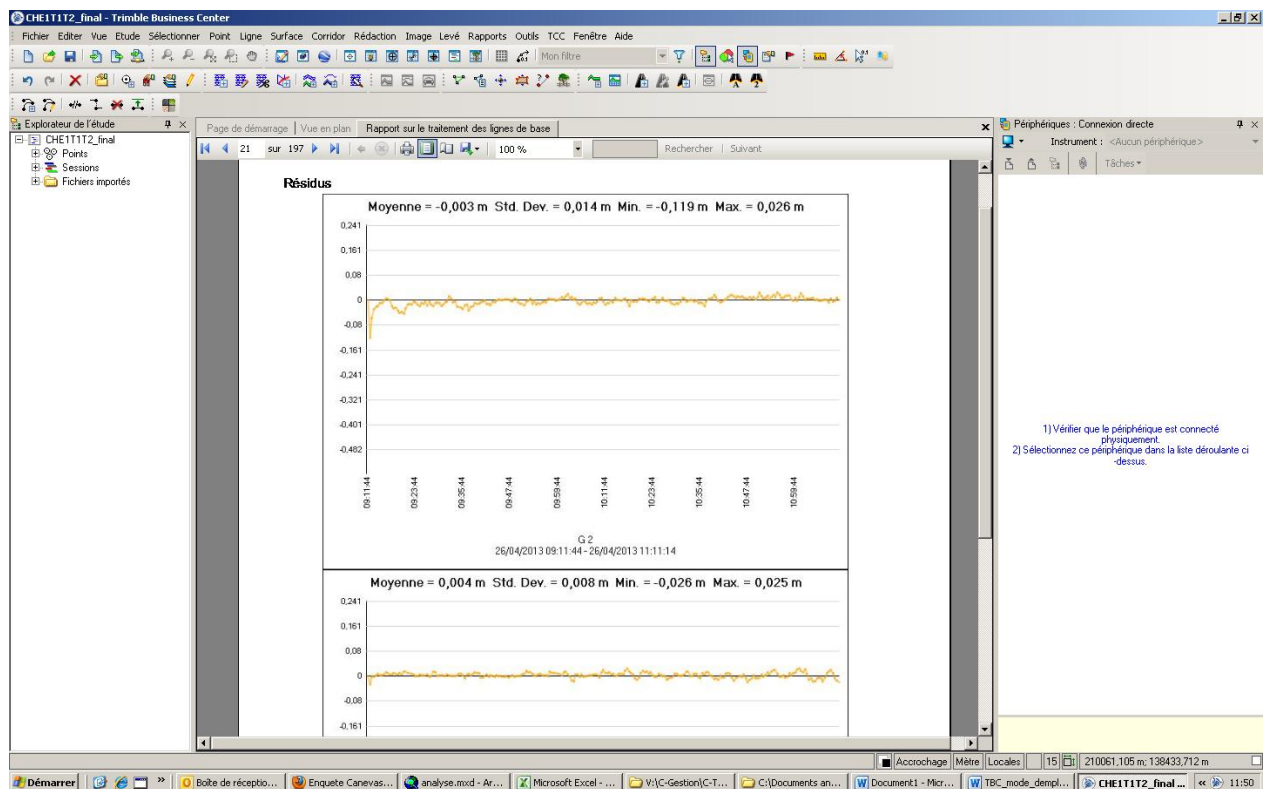


Figure 83 : Exemple de résidus sur le satellite G2.

La suite consiste en l'ajustement. **Levé (Ajuster un réseau.** On fixe d'abord tous les points en 2D et la hauteur seulement sur Rennes (ajustement semi-contraint). On lance l'ajustement

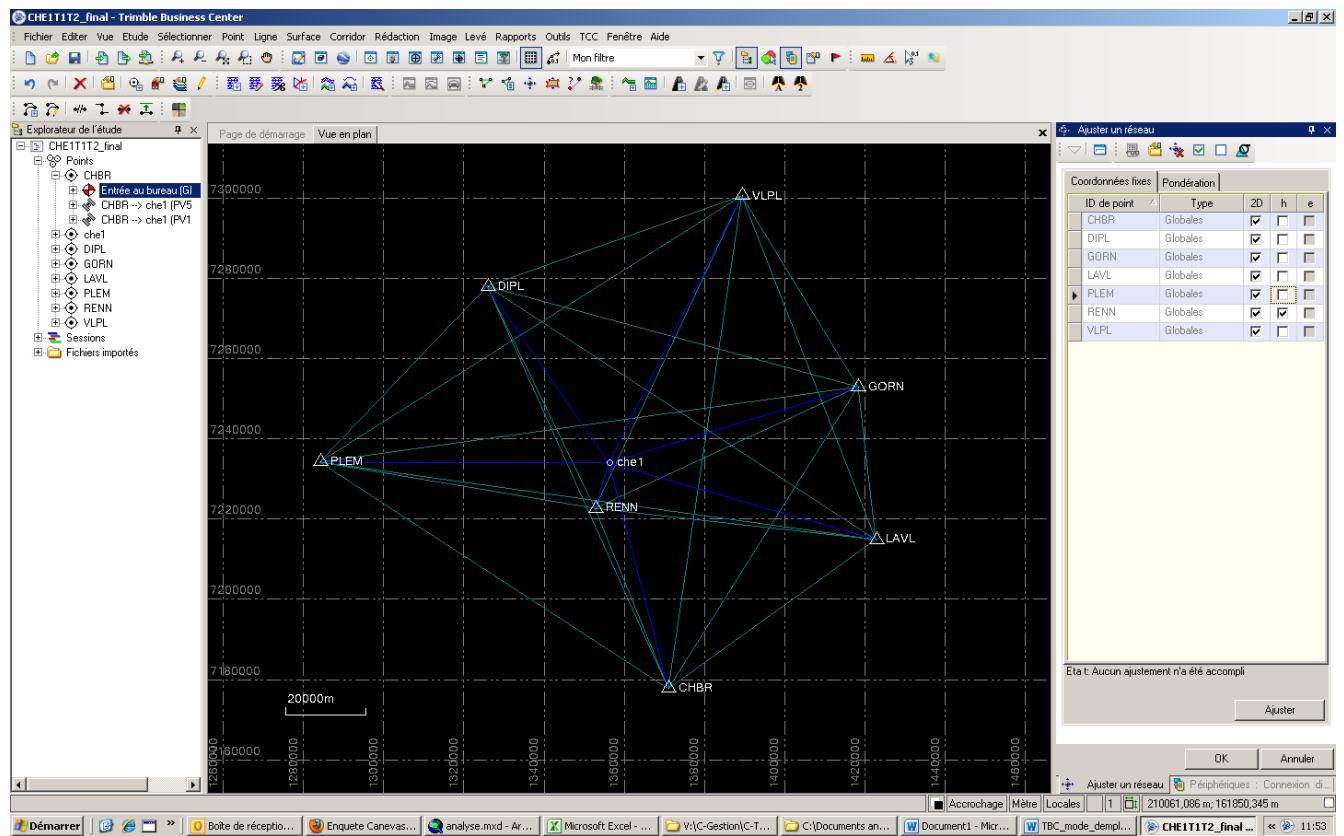


Figure 84 : Ajuster le réseau.

Si le test de chi-deux a échoué, réaliser la pondération en appuyant sur \* et génération du rapport

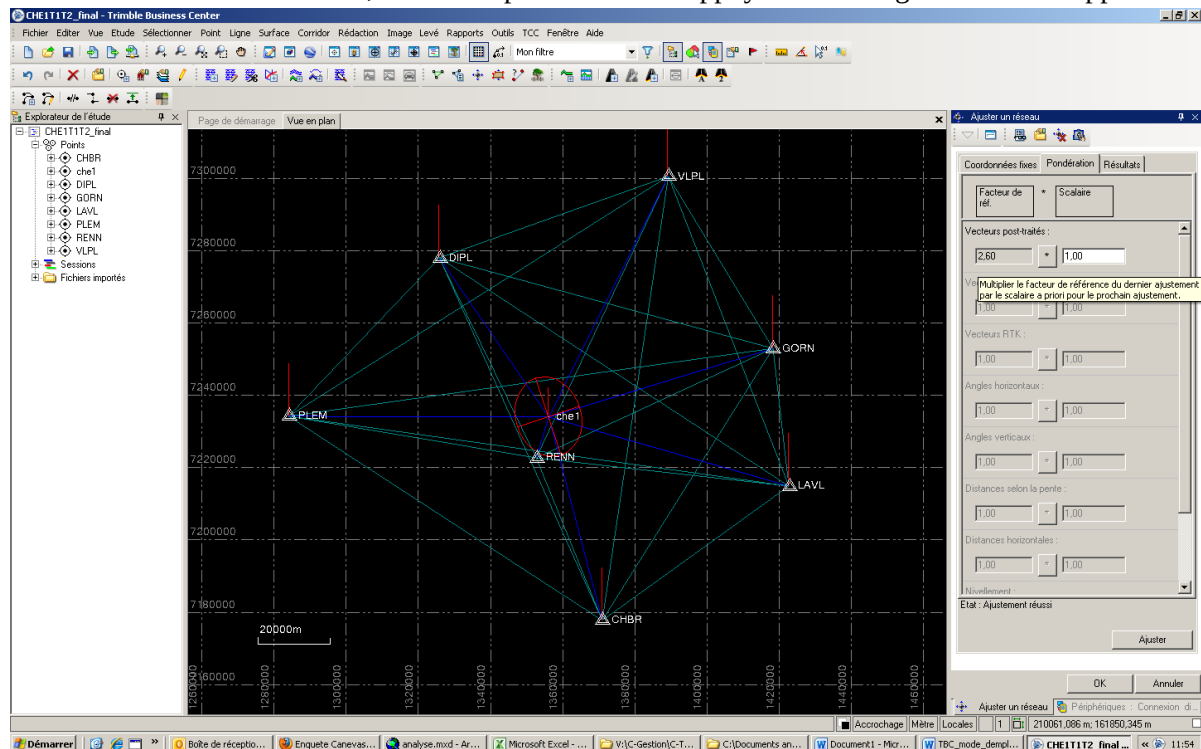


Figure 85 : Pondération.

Par la suite, on analyse ce rapport. Si  $\Delta$  Hauteur est supérieure à 0.018 m, la hauteur des points ne sera pas utilisée dans l'ajustement. Cette sélection se fait aussi par une appréciation personnelle (exemple, si tous inférieur à 3 mm et un à 15 mm supprimer ce dernier).

- Paramètres d'ajustement
- Statistiques d'ajustement
- Comparaisons des coordonnées de contrôle
- Contraintes des points de contrôle
- Coordonnées de grille ajustées
- Coordonnées géodésiques ajustées
- Coordonnées ECEF ajustées
- Composants de l'ellipse d'erreur
- Observations GPS ajustées
- Termes dans la covariance

Echelle sur l'erreur linéaire [S]:1,960

Statistiques d'ajustement

Nombre d'itérations pour un ajustement réussi:2

Facteur de référence du réseau:2,60

Test de Khi-deux (95 %):Echoué

Niveau de confiance de la précision:95%

Degrés de liberté:31

Statistiques des vecteurs post-traités

Facteur de référence:2,60

Nombre de redondances:31,00

Un scalaire a priori:1,00

Comparaisons des coordonnées de contrôle

Les valeurs indiquées sont des coordonnées de contrôle moins les coordonnées ajustées.

| ID de point | ΔAbscisse (Mètre) | ΔNord (Mètre) | ΔAltitude (Mètre) | ΔHauteur (Mètre) |
|-------------|-------------------|---------------|-------------------|------------------|
| CHBR        | ?                 | ?             | ?                 | 0,002            |
| DIPL        | ?                 | ?             | ?                 | 0,017            |
| GORN        | ?                 | ?             | ?                 | 0,022            |
| LAVL        | ?                 | ?             | ?                 | 0,018            |
| PLEM        | ?                 | ?             | ?                 | -0,015           |
| VLPL        | ?                 | ?             | ?                 | 0,032            |

Figure 86 : Rapport d'ajustement.

Ensuite, on décoche le 2D des trois premiers points, on ajuste, si nécessaire pondération.

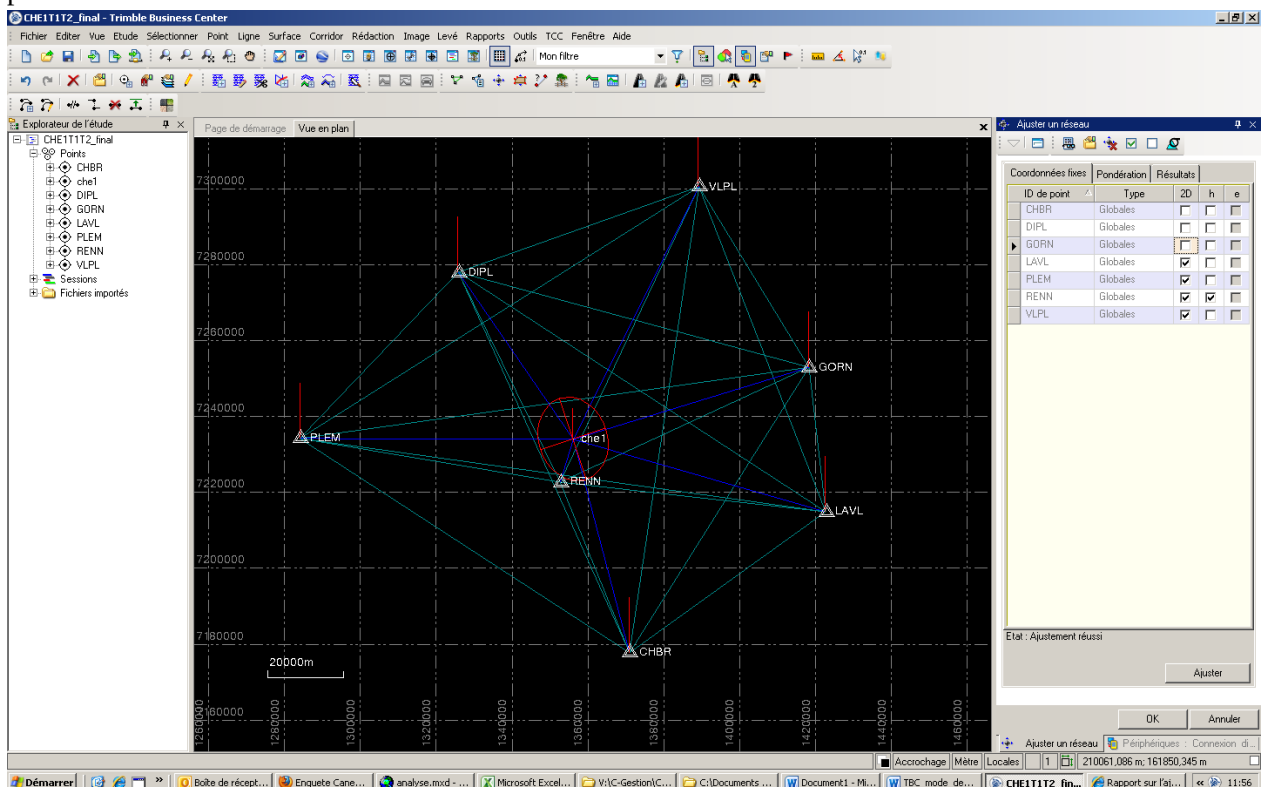


Figure 87 : Ajuster en gardant seulement 3 points en 2D.

Génération du rapport d'ajustement et analyse. Si  $\Delta$  Abscisse et  $\Delta$  Nord trop élevés ne pas les prendre en compte dans la suite des calculs.

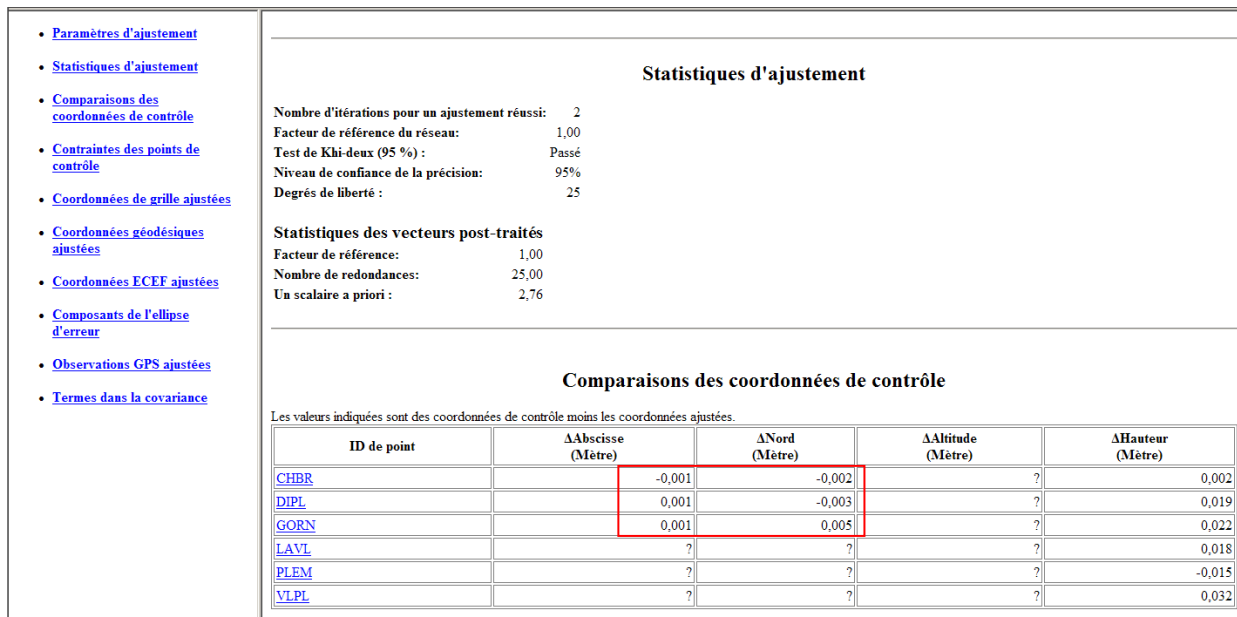


Figure 88 : Rapport d'ajustement.

Et faire de même en gardant les trois premiers points en 2D.

Enfin, on relance l'ajustement en ayant choisi les coordonnées nécessaires au calcul grâce à l'analyse des rapports d'ajustement. Pondération si besoin.

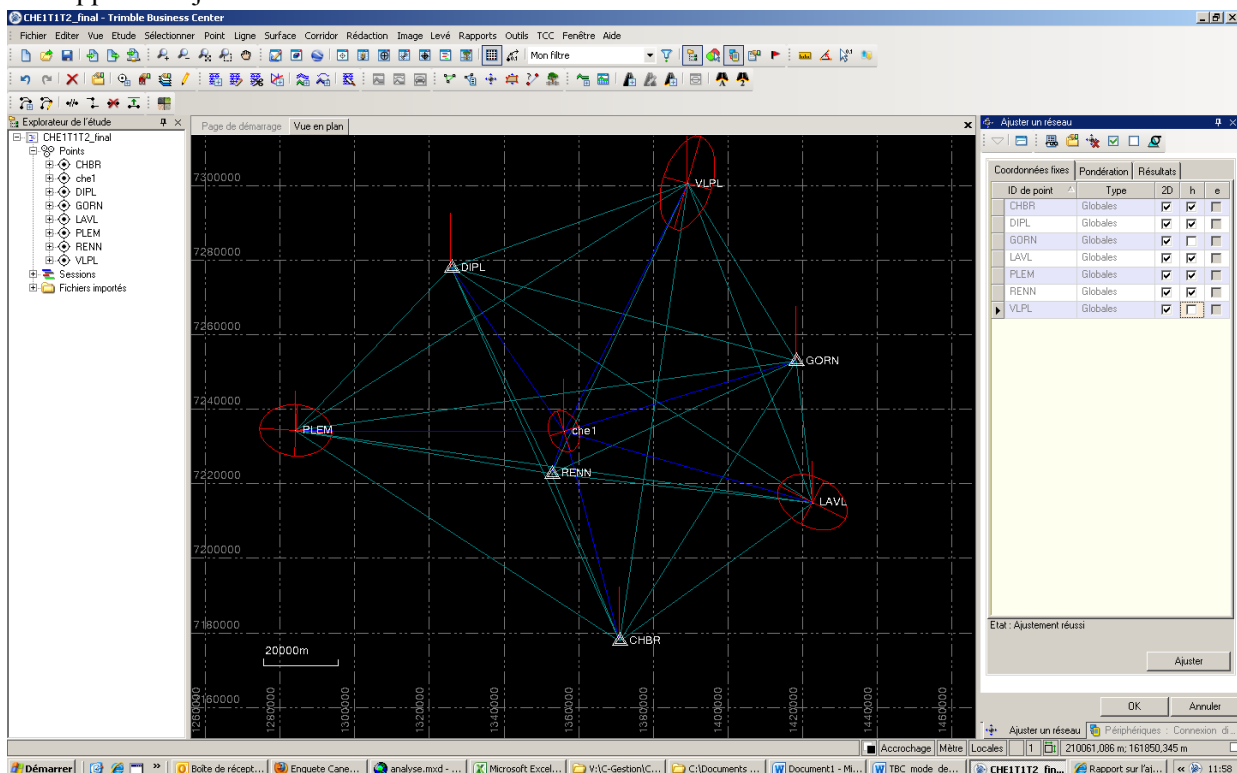


Figure 89 : Après analyse sélection des points et ajustement.

TBC fournit des ellipses d'erreur pour chaque point calculé. Cliquer dans l'explorateur de l'étude sur le point calculé et double clic pour afficher les coordonnées.

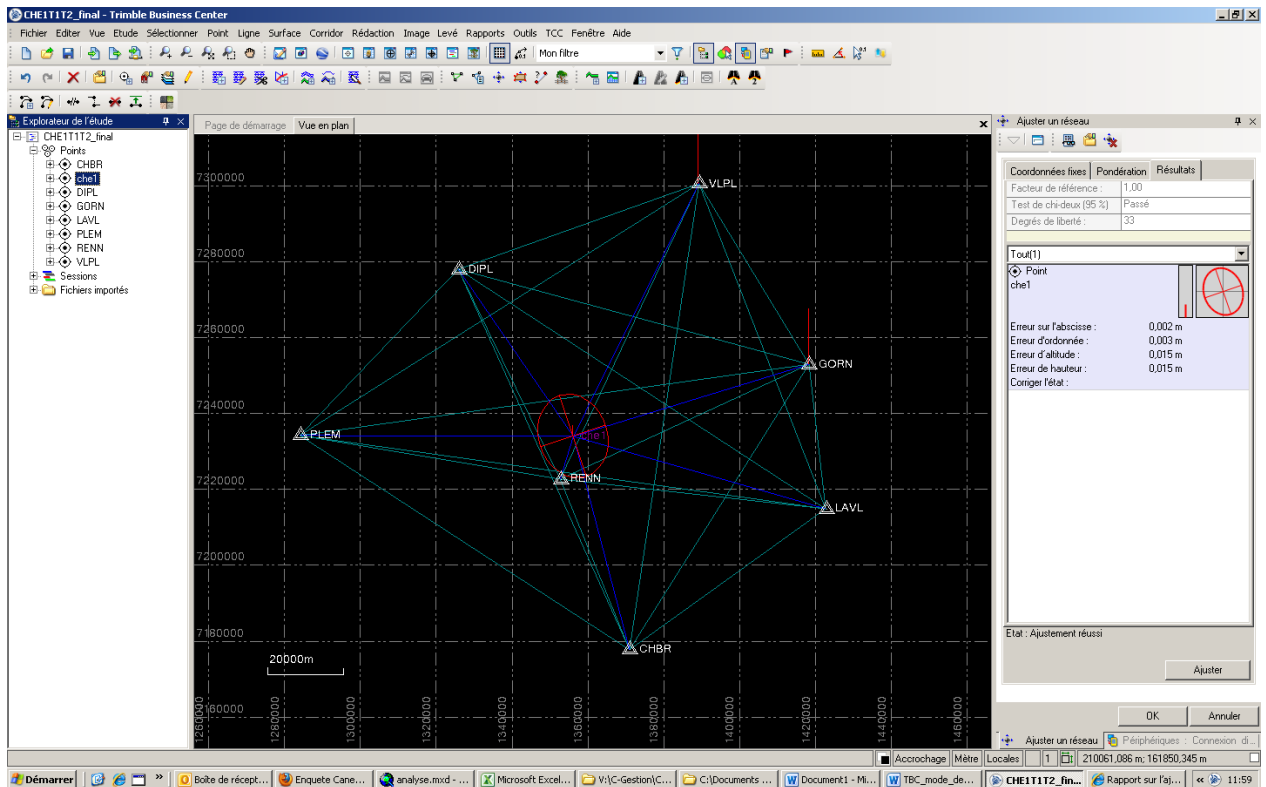


Figure 90 : Ellipse d'erreur sur le point calculé.

## Annexe 9

# ASPECTS ADMINISTRATIFS

Cette annexe présente l'ensemble des pièces administratives qui ont vu une mise à jour suite à ce projet de fin d'études.

### 1. Chapitre du cahier des prescriptions topographiques du service SIG de Rennes Métropole concernant les systèmes de références géographiques

#### Systèmes de références géographiques

##### 1 - Les référentiels

###### 1.1 Planimétrie

Deux systèmes sont utilisés sur l'agglomération rennaise : le RGF93 et la projection conique conforme associée (CC48) ainsi que le REN09.

La triangulation Ville de RENNES d'origine (VDR79) a été calculée dans un système indépendant (projection plane) sans altération linéaire ; on peut ainsi s'affranchir dans les calculs (points de détail, constructions géométriques, implantations) de la correction d'altération linéaire.

Le système REN09 reprend les avantages de cette triangulation et est de plus compatible avec le référentiel français RGF93 en utilisant simultanément :

- l'ellipsoïde de Clarke 1880,

- une projection conique conforme sécante Lambert définie suivant des paramètres propres à Rennes-Métropole afin de ne pas réintroduire de correction due à l'altération linéaire.

Les levés réalisés intra-rocade de Rennes devront être dans ce référentiel REN09 et les levés en dehors de la rocade seront à réaliser en CC48.

## 1.2 Altimétrie

Les altitudes sont définies dans le système des Altitudes Normales IGN69 et s'appuient sur les 1 200 repères définis sur le territoire de la Ville de RENNES pour les levés sur ce territoire. Les levés sur les autres communes s'appuieront sur les repères IGN ainsi que sur ceux mis en place par le service SIG.

## 1.3 Paramètres des systèmes

| PROJECTION   | Type                     | Latitude origine | Méridien origine | Parallèles standards | X0      | Y0      | Ellipsoïde       |
|--------------|--------------------------|------------------|------------------|----------------------|---------|---------|------------------|
| <b>CC48</b>  | Conique conforme sécante | 48°N             | 3°E              | 47°15N<br>48°45N     | 1700000 | 7200000 | GRS80            |
| <b>REN09</b> | Conique conforme sécante | 48°06'N          | 2°15'12.3<br>6E  | 48°N<br>48°12'N      | 340000  | 60000   | CLARKE1880 (IGN) |

Altitude normale IGN69 = Altitude orthométrique Lallemand + 0.30 m.

## 2 Changement de référentiels

### 2.1 Enjeux

Les systèmes de coordonnées absolues utilisés à Rennes Métropole pour localiser tous les objets décrits dans la Base de Données ont été modifiés le 11 Mars 2009, au niveau de la position en plan. Aujourd'hui, tous nos échanges de données avec nos partenaires extérieurs se font exclusivement dans les systèmes de coordonnées planes (projections) REN09 et RGF93/CC48 et dans le système d'altitudes normales IGN69. Le système REN09 offre la sécurité d'une altération linéaire nulle (pas de différence de longueur entre les représentations et la réalité); la zone d'application de cette projection est l'intra-rocade. D'autres systèmes étant en vigueur auparavant, il faut y faire attention. Toute confusion entre les systèmes anciens et nouveaux, lors d'échanges de données, serait en effet très dommageable et pourrait entraîner, par exemple, des raccords de réseau inopérants ou le décalage de limites parcellaires, bâtiments, voirie...

### 2.2 Raisons du changement

Trois éléments ont rendu ce changement indispensable :

- L'application du décret n° 2006-272 du 3 Mars 2006, qui impose aux acteurs de l'information géographique publics et privés de diffuser leurs cartes et informations géographiques dans le nouveau système national RGF93 et son référentiel altimétrique associé IGN69.

- Des avancées technologiques, notamment le GPS (système de localisation par satellites), qui ont permis de créer des systèmes plus précis auxquels il faut s'adapter.
- L'aspiration à pouvoir combiner plus facilement nos données avec celles de nos partenaires dans le nouveau système.

### 2.3 Le changement

**Le 11 Mars 2009**, les systèmes de coordonnées planes (projections) VDR79 et NTF/Lambert zone ont été remplacés respectivement par les systèmes REN09 et RGF93/CC48.

Le système d'altitudes normales IGN69 est le seul qui fasse référence sur l'intégralité du territoire de Rennes Métropole.

|                       | Type de système       | Données topographiques Echelle 1/200e       | Données générales Echelle >1/2000e   |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Avant le 11 mars 2009 | système planimétrique | VDR79 *                                     | NTF/Lambert II                       |
|                       | système altimétrique  | Lallemand dites Altitudes Orthométriques    | Lallemand (IGN69 exceptionnellement) |
| Après le 11 mars 2009 | système planimétrique | REN09 (intra-rocade)<br>CC48 (extra-rocade) | RGF93/CC48                           |
|                       | système altimétrique  | IGN69 dites Altitudes Normales              | IGN69 dites Altitudes Normales       |

\*Nota : Pour des opérations situées en périphérie de la commune de Rennes, le système de projection VdR79 a été régulièrement été utilisé

### 2.4 Mode opératoire avec les données datant d'avant le 11 mars 2009

Toute documentation utilisée après le 11 mars 2009 doit être référencée dans les systèmes, en vigueur indépendamment de son format et de sa date de création.

Ainsi, toute documentation réalisée dans les anciens systèmes et encore utilisée après le 11 mars 2009 doit être dupliquée pour être basculée dans les nouveaux systèmes.

Le service SIG pourra fournir les informations techniques nécessaires à la migration des données.

La documentation papier doit comporter systématiquement un cartouche mentionnant le système de coordonnées planes et le système d'altitudes utilisés pour éviter toute confusion.

## **2. Chapitre du cahier des prescriptions topographiques du service SIG de Rennes Métropole concernant les polygonations**

### **Polygonation**

Les travaux à exécuter par le prestataire ont pour objet la détermination, dans les systèmes planimétrique (REN09 ou CC48 précisés lors de la commande) et altimétrique IGN69 Altitudes Normales, de bornes ou repères constituant les sommets d'un canevas complémentaire.

#### **1 - Préambule général**

En application de l'arrêté sur les classes de précision du 16 septembre 2003, il ne doit être prescrit qu'une obligation de résultats ; il est cependant préférable pour le prestataire d'utiliser la méthodologie décrite ci-après, qui a montré son efficacité depuis de nombreuses années. Une autre méthodologie peut être employée, sous réserve que les résultats des contrôles définis par l'arrêté des classes de précision soient conformes.

##### **1.1 - Précisions recherchées**

A l'occasion de chaque prestation, le service SIG fournira les points d'appui existants, fixes, utiles au géomètre dont le travail se limitera à la détermination des points nouveaux du canevas nécessaires pour la prestation.

##### **Sur la Ville de Rennes**

Tant en planimétrie qu'en altimétrie, les canevas de base ont une précision centimétrique.

Les opérations complémentaires qui nous sont confiées visent à garantir cette même gamme de précision.

La qualité de cette polygonale constitue la garantie de fiabilité des informations numériques qui seront engrangées dans la base de données.

En planimétrie : La classe de précision totale applicable aux sommets de canevas sera de 2 cm.

En altimétrie : La classe de précision totale applicable aux sommets de canevas sera de 1cm.

##### **Sur les communes de RM**

En planimétrie, le canevas de base mis en place devra avoir une classe de précision de 2 cm.

En altimétrie, il devra avoir une classe de précision de 1 cm.

##### **1.2 - Les méthodes**

La constitution du canevas en planimétrie peut être réalisée :

- suivant la méthode GPS, (voir " Recommandation liée au technique GNSS" )

- de façon conventionnelle à l'aide de tachéomètres électroniques.

Ces derniers permettent la mesure simultanée des angles horizontaux et verticaux, ainsi que la distance. Il faudra toujours s'astreindre à la mesure complète de ces trois éléments et des mesures associées sur les sommets de polygonation (hauteurs de voyant et d'appareil). De plus des visées sur des références aériennes sont recommandées.

Le calcul en bloc ultérieur permettra l'exploitation des données surabondantes, et offrira toute garantie de contrôle sur l'état de conservation et l'identification des stations.

L'altimétrie des stations est obtenue par un nivellement direct qui doit confirmer les résultats obtenus antérieurement par nivellement trigonométrique.

## **2 - Canevas directeur**

Pour chaque zone, il sera remis au géomètre :

- un schéma d'ensemble du canevas directeur à l'échelle du 1/2000e,
- une fiche signalétique pour chaque sommet du canevas directeur,
- les fiches signalétiques des sommets utilisables en orientation pour les opérations de polygonation complémentaire,
- une extraction locale de la base de données des stations existantes sur le territoire de Rennes Métropole.

## **3 - Canevas complémentaire**

Le canevas directeur sera complété par le géomètre, pour les besoins des travaux qui lui sont confiés.

### **3.1 - Configuration du canevas**

Les sommets sont destinés à étendre ou à remplacer les points du canevas directeur.

Les sommets seront judicieusement disposés dans un souci de conservation et de bonne configuration du réseau.

Le géomètre combinera, lorsque les contraintes du terrain l'imposeront :

- un canevas de charpentes constitué de côtés homogènes et longs (généralement supérieurs à 100 mètres)
- un canevas de lever constitué de :
  - . stations alignées,
  - . polygonales complémentaires.

Chaque station créée devra être réutilisable pour d'autres interventions et doit être conçue en conséquence.

Il convient de veiller notamment à la visibilité des références et de la totalité de l'espace environnant. Le recours aux stations lancées (antennes) sera exceptionnel et réservé à des circonstances extrêmement défavorables ; un cheminement en antenne ne pourra comporter plus d'une station lancée.

### **3.2 - Immatriculation des stations**

Le matricule d'une station est unique pour l'ensemble de la base de données de RENNES.

Pour respecter ce principe, le service SIG (Contact : B. GUILLOPE - tel 02 23 62 10 10 poste 308304 - en second lieu S. GELIN poste 351628) sont seuls habilités à délivrer les plages d'immatriculation des stations à créer.

Le matricule de chaque station est rappelé de façon non équivoque sur l'ensemble des documents (fichiers, carnets de terrain, schémas...) qui lui font référence.

### **3.3 - Modes opératoires des observations**

A – Les mesures au GPS seront réalisées suivant les prescriptions de la note " Recommandation liée au technique GNS"

B - Les mesures de longueur des côtés seront exécutées à l'aide d'un télémètre électro-optique.

Elles recevront les corrections de réduction à l'horizontale et au niveau zéro.

Dans le cas de l'utilisation du système REN09, il n'y a pas de corrections supplémentaires à apporter, les paramètres de la projection REN09 ayant été définis afin de rendre négligeable la correction due à l'altération linéaire entre les parallèles 47°54' et 48°18', qui correspond à l'étendue du territoire de Rennes-Métropole.

Pour l'utilisation du système de référence RGF93-CC48, les distances devront être corrigées de l'altération linéaire.

C - Les mesures angulaires seront effectuées à l'aide d'un tachéomètre électronique assurant des lectures au milligrade, suivant la méthodologie suivante :

- de chaque point extrémité de cheminements, il sera visé au moins deux points de référence connus, de préférence aériens, suivant la méthode d'observation décrite ci-après ;
- les angles du cheminement seront observés par série de trois lectures :
  - . sur la référence, deux fois un pointé, une lecture,
  - . sur chaque point de polygonation, trois fois un pointé, une lecture,
  - . sur la référence en fermeture, un pointé, une lecture.

La méthode des trois trépieds (centrage forcé) est conseillée. En cas de visée sur canne, toutes précautions garantissant la qualité des angles et des distances (verticalité, centrage, stabilité au moyen de porte-jalons) devront être prises. Il est demandé, autant que faire se peut, de viser une référence aérienne à partir des sommets intermédiaires de cheminement.

#### D - Nivellement des stations

Les altitudes des stations de polygonation complémentaires seront déterminées par nivellement direct.

Les altitudes définitives seront systématiquement confrontées aux résultats préalablement obtenus par nivellement indirect ou par mesure GNSS.

Pour autoriser ces contrôles, il est obligatoire de mesurer sur chaque station les hauteurs d'appareil, de voyants, les angles verticaux et les distances réciproques.

### **4 - Opérations de calculs**

Tout réseau polygonal devra être compensé par la méthode des moindres carrés.

Même dans le cas d'une seule ligne polygonale, cette méthode de calcul est applicable et autorise la prise en compte de toutes données surabondantes.

Le paramétrage de l'outil de calcul devra cependant parfaitement distinguer :

- les points d'appuis dont les coordonnées fixes ne doivent en aucun cas être altérées par le calcul
- les points nouveaux objets de la détermination

### **5 - Pièces à fournir**

Chaque opération donne lieu à la transmission des pièces suivantes :

- un schéma de polygonation à l'échelle du 1/2000e ou 1/5000e (suivant l'importance du chantier)
- les calculs de la compensation en bloc par les moindres carrés

Les imprimés (ou listings) de calcul devront faire ressortir les écarts de fermetures angulaires, planimétriques et altimétriques.

- les fichiers des enregistrements des observations de terrain (fichier carnet électronique)
- les fichiers de mesures GNSS
- Les fichiers de nivellement.....

Un dossier qui regroupe l'ensemble des mesures de polygonation réalisées sur la zone de lever sera archivé par le géomètre.

Le service SIG (Pôle Données de Référence) sera destinataire du fichier de la fiche signalétique de chaque station (Cf § 9).

## **6 - Tolérances planimétriques**

Les écarts seront constatés au terme d'un calcul en bloc effectué par la méthode des moindres carrés.

Tout rayon moyen d'indécision supérieur à quatre centimètres sur un point donné devra faire l'objet d'une remarque auprès du service SIG (Contact : Bertrand GUILLOPE - Tél. : 02.23.62.10.10 Poste 308304 et Fax : 02.23.62.22.79 avec indication du destinataire).

Des processus d'auto-contrôle devront être mis en œuvre par le prestataire pour garantir la précision recherchée.

## **7 - Validation des résultats**

Chaque calcul de canevas sera soumis au service SIG qui validera les résultats après contrôle des résidus de la compensation.

Le calcul des points de détail interviendra après cette validation (les stations nouvelles sont alors enregistrées dans le fichier général du canevas).

En livraison finale, la qualité du canevas sera soumise à un contrôle terrain. L'échantillon pris en compte pour la vérification portera sur le carré du logarithme népérien du nombre de stations déterminées par le prestataire.

## **8 - Matérialisation des sommets**

Les sommets seront matérialisés par des repères constitués de matériaux durables (tels que bornes ciment ou plastique, tige de fer ou clou à béton).

## **9 - Fiches signalétiques**

Elles feront partie du dossier final remis par le géomètre.

Il convient de noter que :

- Les points levés choisis comme rattachements, quatre minimum, devront être suffisamment identifiables et fiables pour permettre le rétablissement (par relèvement, trilatération) d'une nouvelle station, si nécessaire ;
- Des cotes chaînées (distance station, fil d'eau de bordure par exemple) devront être prises en complément et portées sur le croquis orienté ;
- Le croquis orienté devra être suffisamment explicite pour situer la station de façon immédiate sur le territoire communal (noms de rues, numéros de voirie, plans de situation complémentaires...).

### 3. Recommandation liée au technique GNSS

#### **CANEVAS DE POLYGONATION :**

Les stations doivent être implantées en zone la plus dégagée possible pour éviter les masques qui tronquent la constellation satellite et les multi-trajets qui dégradent l'information (proximité immédiate d'arbres, de bâtiments ou de grands panneaux...).

Elles seront déterminées soit par mesures temps réel (RTK) (si possible par rattachement au réseau Teria), soit par mesures statiques avec post traitement. S'il y a utilisation du réseau Teria, il faudra vérifier sur le site <http://www.reseau-teria.com> que la station RENN est bien en fonctionnement. En effet, depuis peu, la station GNSS permanente de la Ville de Rennes a été intégrée à ce réseau. Si le prestataire ne possède pas de connexion au réseau Teria, il pourra dans tous les cas se rattacher à la station GPS permanente de la Ville de Rennes (référéncée RGP : RENN) par mesures temps réel (RTK). Cette connexion est disponible gratuitement en faisant la demande au service SIG.

Les stations pourront être observées en temps réel sous ces conditions :

N'observer que lorsque le critère de qualité planimétrique affiché n'excède pas 1,5 cm,

Réaliser deux sessions de mesures d'une minute à au moins 2h d'intervalle (pour utiliser deux configurations satellites différentes).

Ces deux mesures ne doivent pas présenter un écart de plus de 2 cms en planimétrie, sinon prendre une troisième mesure.

En faire la moyenne.

Les stations pourront être observées en statique sous ces conditions :

Réaliser deux sessions de mesures de 45 minutes minimum (plus une minute par kilomètre de ligne de base) avec une constellation de 5 satellites minimum à au moins 2h d'intervalle.

Ces deux mesures ne doivent pas présenter un écart de plus de 2 cms en planimétrie.

En faire la moyenne.

À chaque fois que ce sera possible, faire une mesure de contrôle sur une ou plusieurs stations préalablement déterminées par GPS.

Les anciennes stations non-GPS présentes à proximité devront également être stationnées pour vérifier la concordance avec l'ancien.

Altimétrie : les stations devront être nivelées par nivellement direct en s'appuyant sur les repères de nivellement VDR pour la Ville de Rennes et les repères de nivellement de l'IGN pour Rennes Métropole hors Ville de Rennes.

#### **RELEVES TOPOGRAPHIQUES :**

La précision étant un peu moins contraignante que celle des canevas, on peut se permettre de ne faire qu'une mesure de 10 s en GPS temps réel par point à condition de ne pas dépasser un critère de qualité 3D de 3 cms et de se contrôler par des mesures sur des stations existantes en début et en fin de lever, et par la réitération de mesures sur un certain nombre de points du lever.